



TUGAS AKHIR - SM141501

**DESAIN PENGENDALIAN PINTU AIR DENGAN
METODE SLIDING MODE CONTROL (SMC)**

MOH. FAHMI MUZAKI
NRP 1211 100 103

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si

JURUSAN MATEMATIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - SM141501

**CONTROL DESIGN OF FLOODGATE WITH
SLIDING MODE CONTROL (SMC) METHOD**

MOH. FAHMI MUZAKI
NRP 1211 100 103

Supervisors:
Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si

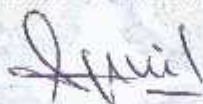
DEPARTMENT OF MATHEMATICS
Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

LEMBAR PENGESAHAN
DESAIN PENGENDALIAN PINTU AIR
DENGAN METODE *SLIDING MODE*
***CONTROL* (SMC)**
CONTROL DESIGN OF FLOODGATE WITH
SLIDING MODE CONTROL (SMC)
METHOD

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Matematika Terapan
Program Studi S 1 Jurusan Matematika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Oleh:

MOH. FAHMI MUZAKI
NRP. 1211 100 103

Menyetujui,
Dosen Pembimbing,



Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si
NIP. 19660414 199102 2 001

Mengetahui,
Karya Jurusan Matematika
IPA ITS



Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si
NIP. 19660414 199102 2 001

Surabaya, Juli 2015

DESAIN PENGENDALIAN PINTU AIR DENGAN METODE *SLIDING MODE* *CONTROL* (SMC)

Nama Mahasiswa : Moh. Fahmi Muzaki
NRP : 1211 100 103
Jurusan : Matematika FMIPA-ITS
Pembimbing : Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si

Abstrak

Banjir sungai Bengawan Solo disebabkan oleh curah hujan yang sangat tinggi di area hulu. Salah satu cara untuk mengatasinya adalah pembuatan sodetan di desa Pelangwot, Laren, Lamongan. Sodetan tersebut mempunyai pintu air yang pengoperasiannya dilakukan secara manual. Hal ini rawan terjadinya kesalahan yang dapat menyebabkan banjir. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu control yang mengendalikan pintu air tersebut secara otomatis dan salah satunya adalah metode *Sliding Mode Control* (SMC). Hasil simulasi dengan metode SMC memperlihatkan bahwa saat ketinggian air sungai belum mencapai H_d , maka ketinggian air selanjutnya akan menuju ke nilai Z_D dan pintu air bergerak sedemikian hingga ketinggian air menuju ke nilai Z_D . Sedangkan saat ketinggian air sungai sudah mencapai H_d , maka ketinggian air selanjutnya akan berada di sekitar nilai H_d dan pintu air akan bergerak sedemikian hingga ketinggian air stabil di nilai H_d . Metode SMC tidak mampu mengendalikan ketinggian air sungai saat debit air sungai sangat besar.

Kata-kunci: *pintu air, Sliding Mode Control (SMC), sodetan Pelangwot.*



"Halaman ini sengaja dikosongkan"

CONTROL DESIGN OF FLOODGATE WITH SLIDING MODE CONTROL (SMC) METHOD

Name : Moh. Fahmi Muzaki
NRP : 1211 100 103
Department : Mathematics FMIPA-ITS
Supervisor : Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si

Abstract

Bengawan Solo river floods caused by very high rainfall in the upstream area. The way to solve that problem is constructing floodway in Pelangwot, Laren, Lamongan. The floodway have manual floodgates which have limitation of human observation. Therefore, it need a control system that controls the gate automatically and in this research used Sliding Mode Control (SMC) method. The simulation results of SMC method showed when the water level of the river has not reached the H_d , the water level will be heading to the value of Z_D and the floodgate will move so that water level leading to a value of Z_D . Meanwhile, when the water level of the river already reached H_d , then water level will be stayed around the value of H_d and the floodgates will move so that the water level stabilized at a value of H_d . SMC method is not able to control the water level in the river when the flow of water is very large.

Key-words: *floodgate, Pelangwot floodway, Sliding Mode Control (SMC)*



"Halaman ini sengaja dikosongkan"

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirobbil'aalamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, tuhan semesta alam, yang telah memberikan segalanya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

"DESAIN PENGENDALIAN PINTU AIR DENGAN METODE *SLIDING MODE CONTROL* (SMC)".

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Studi S-1 Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku Ketua Jurusan Matematika ITS sekaligus dosen pembimbing yang telah memberikan dukungan dan bimbingan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Chairul Imron, M.I.Komp, Ibu Dr. Dwi Ratna S., S.Si, M.T, Ibu Alvida Mustika Rukmi, S.Si, M.Si, dan Ibu Dra. Wahyu Fistia Doctorina, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik demi perbaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Drs. Kamiran, M.Si selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik, motivasi, canda

tawa, dan semangat selama penulis kuliah di Jurusan Matematika FMIPA ITS.

4. Bapak Dr. Chairul Imron, M.I.Komp selaku Ketua Prodi S1 Matematika ITS.
5. Bapak dan Ibu dosen serta para staf Jurusan Matematika ITS.
6. Teman-teman mahasiswa Jurusan Matematika ITS.
7. Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan motivasi, yang tidak dapat Penulis sebut satu persatu.

Penulis juga menyadari bahwa dalam Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Akhirnya, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

Sejuta Terima Kasihku Untuk :

1. Allah SWT, Tuhan semesta alam, dan Nabi Besar Muhammad SAW yang telah memberikan segalanya pada kehidupan penulis.
2. Kedua orang tua (A. Ridwan dan Siti Kholifah), kakak Abi Ya'la, serta segenap keluarga besar yang telah memberikan do'a, dukungan, motivasi, dan nasehat sampai dengan detik ini.
3. Kak Jahidul Umam (Kimia), Kak Lino Meris Rahmanto (T. Kimia), Kak Abdul Ghofar (T. Mesin) sebagai guru sekaligus teman yang telah memberikan kesempatan besar untuk menuntut ilmu non-akademik.
4. Odhi (T. Industri), Hilmi (Matematika), Iyin (T. Informatika), Bundha Cham (T. Kelautan), Intan (Kimia), Arun (T. Informatika), Hafid (Sistem Informasi), Rifky (T. Industri), Edwin (T. Industri), Indi (Statistika), Toni (matematika) yang telah menemani penulis menuntut ilmu non-akademik dan mengajarkan tentang kehidupan.
5. Meli (Kimia), Rohim (T. Lingkungan), Resti (T. Lingkungan), Liha (Biologi), Ninit (Matematika), Oliv (T. Material & Metalurgi) yang telah memberikan pelajaran tentang kepemimpinan.
6. Keluarga Besar UKM KSR PMI ITS yang telah memberikan tawa, canda, kasih sayang, tangis, dan semua tentang kehidupan.
7. Yahya, hilmi, fendi, fikri, farid yang telah mengukir sejuta senyum dengan ke-*koplak*-an masing-masing selama ini.

8. Keluarga Besar MATEMATIKA 2011 secara bersama-sama mengukir segenap asa, impian, dan cita-cita selama kuliah.

9. Zulfah Permata Illiyin yang telah menuntun penulis untuk tetap berproses menuju kedewasaan.

10. Semua pihak yang tak bisa penulis sebutkan satu-persatu, terima kasih telah membantu sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR SIMBOL	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sungai.....	7
2.2 Bendungan.....	9
2.2.1 Model <i>Reservoir</i>	10
2.2.2 Model Pintu Air.....	11
2.3 Sodetan Pelangwot.....	11
2.4 Sistem Pengendalian	13

2.5	<i>Sliding Mode Control (SMC)</i>	15
2.5.1	Fungsi <i>Switching</i>	15
2.5.2	Kondisi <i>Sliding</i>	16
2.5.3	Perancangan <i>Sliding Mode Control</i> (SMC)	17
2.5.4	<i>Sliding Mode Control</i> dengan <i>Boundary Layer</i>	17
BAB III	METODE PENELITIAN.....	21
3.1	Tahap Penelitian	21
3.2	Diagram Alir Penelitian	23
BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1	Pemodelan Matematika Sistem Pintu Air ...	25
4.2	Desain Kendali Pintu Dengan Metode SMC	27
4.3	Simulasi dan Hasil	31
4.3.1	Debit Air Musim Kemarau	33
4.3.2	Debit Air Musim Hujan	37
4.3.3	Debit Air Acak	41
4.3.4	Perubahan Parameter Tertentu	44
BAB V	PENUTUP.....	69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	70
DAFTAR PUSTAKA		71
LAMPIRAN A	Data Debit Air	73
LAMPIRAN B	Biodata Penulis.....	77

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Nilai Parameter yang Dibutuhkan pada Simulasi	33
Tabel 4.2	Hasil Simulasi Pengendalian Pintu Air pada Musim Kemarau	36
Tabel 4.3	Hasil Simulasi Pengendalian Pintu Air pada Musim Hujan	39
Tabel 4.4	Hasil Simulasi Pengendalian Pintu Air dengan Debit Air Acak	43
Tabel A.1	Debit Air pada Musim Kemarau	73
Tabel A.2	Debit Air pada Musim Hujan	74
Tabel A.3	Debit Air Acak	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penampang Melintang Sungai	9
Gambar 2.2	Peta Lokasi Sodetan Pelangwot	12
Gambar 2.3	Pintu Air di Sodetan Pelangwot	13
Gambar 2.4	Kondisi Chattering	18
Gambar 2.5	<i>Sliding Mode</i> dengan <i>Boundary Layer</i> .	19
Gambar 4.1	Ketinggian Air Sungai pada Musim Kemarau	34
Gambar 4.2	Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau	35
Gambar 4.3	Ketinggian Air Sungai pada Musim Hujan	38
Gambar 4.4	Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan	39
Gambar 4.5	Ketinggian Air Sungai dengan Debit Air Acak	41
Gambar 4.6	Pengoperasian Pintu Air dengan Debit Air Acak	42
Gambar 4.7	Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Z_D	45
Gambar 4.8	Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Z_D	46
Gambar 4.9	Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Z_D	47
Gambar 4.10	Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Z_D	48
Gambar 4.11	Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Z_D	49

Gambar 4.12 Pengoperasian Pintu Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Z_D	50
Gambar 4.13 Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan H_d	51
Gambar 4.14 Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan H_d	52
Gambar 4.15 Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan H_d	53
Gambar 4.16 Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan H_d	54
Gambar 4.17 Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan H_d	55
Gambar 4.18 Pengoperasian Pintu Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan H_d	56
Gambar 4.19 Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air	57
Gambar 4.20 Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air	58
Gambar 4.21 Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air	59
Gambar 4.22 Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air	60
Gambar 4.23 Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air	61
Gambar 4.24 Pengoperasian Pintu Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air	62

Gambar 4.25 Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air	63
Gambar 4.26 Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air	64
Gambar 4.27 Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air	65
Gambar 4.28 Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air	66
Gambar 4.29 Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air	67
Gambar 4.30 Pengoperasian Pintu Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air	68

Daftar Simbol

l	Lebar sungai.
P	Tampang basah.
A	Luas penampang sungai.
y_b	Ketinggian <i>bed slope</i> .
y	Elevasi muka air sungai.
h	Ketinggian air sungai diukur dari permukaan <i>bed slope</i> ke permukaan sungai.
H	Ketinggian air sebelum melewati pintu air.
Z_D	Ketinggian air setelah melewati pintu air.
ΔH	Selisih ketinggian air sebelum dan sesudah pintu air.
Q_{in}	Rata-rata aliran masuk <i>reservoir</i> .
Q_{out}	Rata-rata aliran keluar <i>reservoir</i> .
Q_P	Rata-rata aliran untuk produksi.
Q_G	Rata-rata aliran yang melewati pintu air.
ε	Parameter yang dapat divariasikan.
OP	Pembukaan pintu air.
A_G	Total luas pintu air.
g	Percepatan gravitasi.
u	<i>Control input</i> .
\mathbf{x}	Vektor keadaan.
\mathbf{x}_d	Vektor keadaan yang diinginkan.
e	<i>Tracking error</i> .
S	Fungsi <i>switching</i> .
Φ	Ketebalan <i>boundary layer</i> .
λ	Konstanta positif pada fungsi <i>switching</i> .
η	Konstanta positif pada kondisi sliding.
$H(1)$	Nilai awal ketinggian air.
$OP(1)$	Pengoperasian awal pintu air.

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas tentang hal-hal yang menjadi latar belakang permasalahan dalam Tugas Akhir ini dan alasan menggunakan metode *Sliding Mode Control*. Setelah itu, inti dari permasalahan yang ada di latar belakang dibentuk dalam rumusan masalah dan dibatasi oleh beberapa asumsi. Selanjutnya dijabarkan tujuan yang diinginkan dan manfaat yang didapatkan dari Tugas Akhir ini. Kemudian sistematika penulisan Tugas Akhir ini diuraikan pada akhir bab ini.

1.1 Latar Belakang

Sungai Bengawan Solo merupakan salah satu sungai terpanjang di Indonesia yang melewati dua provinsi, yaitu Jawa Tengah dan Jawa Timur. Sungai ini mempunyai dua area hulu yang terletak di kabupaten Wonogiri dan Ponorogo yang bertemu di kabupaten Ngawi, kemudian bermuara ke daerah hilir di kabupaten Gresik. Sungai ini memiliki panjang sekitar 600 km dengan luas wilayah sekitar 20.125 km² yang terdiri dari empat Daerah Aliran Sungai (DAS), yaitu DAS Bengawan Solo dengan luas 16.100 km², DAS Kali Grindulu dan Kali Lorog di Pacitan seluas 1.517 km², DAS kecil di kawasan pantai utara seluas 1.410 km² dan DAS Kali Lamong seluas 720 km² (Anonim, 2012).

Sungai Bengawan Solo mempunyai curah hujan yang tinggi di daerah hulu dan banyak mengalami perubahan fungsi lahan, sehingga sungai ini mengalami banjir di bagian hilir khususnya di wilayah Bojonegoro, Tuban, Lamongan dan Gresik. Selain disebabkan oleh debit yang meningkat dari

area hilir, banjir Sungai Bengawan Solo juga disebabkan oleh sedimentasi yang terjadi (Mudjib dan Lasminto, 2013). Untuk mengatasi banjir, sungai ini mengalami banyak modifikasi pada daerah alirannya. Diantaranya adalah pembuatan waduk, bendungan, dan sodetan (*floodway*). Salah satu daerah yang mengalami banjir karena luapan air sungai Bengawan Solo adalah kabupaten Lamongan yang telah menjadi langganan banjir setiap tahunnya, sehingga sungai ini juga mengalami modifikasi di beberapa titik di daerah ini. Salah satunya adalah pembuatan sodetan Pelangwot.

Sodetan Pelangwot berlokasi di desa Pelangwot kecamatan Laren kabupaten Lamongan dengan panjang sekitar 13 km dan lebar sekitar 100 m yang berfungsi untuk menyalurkan debit air dari sungai Bengawan Solo untuk dibuang langsung ke laut Jawa (Lusiana, 2011). Dengan adanya modifikasi ini, aliran sungai Bengawan Solo mempunyai muara di dua tempat yaitu di daerah Lamongan dan Gresik.

Sodetan Pelangwot memiliki pintu air yang dioperasikan secara manual dengan melihat langsung ketinggian air sungai. Kondisi ini rawan terjadinya kesalahan manusia dalam pengoperasiannya sehingga banjir terjadi di sekitar dua muara sungai tersebut. Sehingga dibutuhkan suatu pengendali agar pintu air di sodetan tersebut dapat membuka dan menutup secara otomatis. Hal ini akan membantu pencegahan banjir di salah satu maupun kedua daerah muara sungai.

Pada penelitian sebelumnya, Kalman Filter berbasis *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) digunakan untuk mengendalikan pintu air di PLTA dengan hasil dibutuhkan pengganti pengendali manual dengan pengendali yang menggunakan metode NMPC atau pengendali lain pada pintu air demi keselamatan manusia dan lingkungan dari banjir (Zhou, Thoresen dan Glemmstad, 2012). Selain itu, terdapat pula penelitian tentang pengendalian pintu

air bendung gerak dengan Metode *Ensemble Kalman Filter* berbasis NMPC (Purnaningrum, 2014). Pada penelitian tersebut, Metode *Ensemble Kalman Filter* digunakan untuk memprediksi ketinggian air dan debit air saat mencapai bendungan yang selanjutnya akan digunakan sebagai inputan untuk mengendalikan pintu air. Sedangkan metode NMPC digunakan untuk memperoleh besaran optimum buka pintu air. Hasilnya adalah metode tersebut efektif untuk mengestimasi debit dan ketinggian aliran sungai dengan RMSE (*Root Mean Square Error*) kurang dari 1 dan perubahan *opening gate* kurang dari 25%. Selain itu, metode *Sliding Mode Control* (SMC) pernah digunakan untuk mengendalikan ketinggian air dan temperatur uap pada sistem Steam Drum Boiler dengan hasil metode SMC dapat diterapkan pada pengendalian ketinggian air pada sistem non linear (Herlambang, 2010).

Dari penelitian sebelumnya yang mengatakan bahwa dibutuhkan sebuah sistem pengendali selain pengaplikasian Kalman Filter berbasis NMPC (Zhou dkk., 2012), maka pada penelitian ini digunakan metode *Sliding Mode Control* (SMC) yang telah diterapkan pada pengendalian ketinggian air pada sistem non linear pada penelitian sebelumnya (Herlambang, 2010).

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana desain pengendalian pintu air dengan metode *Sliding Mode Control* (SMC)?
2. Bagaimana analisa hasil simulasi dari penerapan metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada pengendalian pintu air?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Ketinggian air setelah pintu air adalah konstan.
2. Ketinggian air yang diinginkan sebelum pintu air adalah konstan.
3. Pengangkutan sedimen aliran sungai diabaikan.
4. Tugas akhir ini mengambil studi kasus di sodetan (*floodway*) Pelangwot.
5. Data yang digunakan dalam tugas akhir ini diperoleh dari Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta 1.
6. Tugas akhir ini hanya melakukan analisis pengendalian dengan metode *Sliding Mode Control* (SMC) tanpa membuat *prototype* pengendali.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui desain pengendalian pintu air dengan penerapan metode *Sliding Mode Control* (SMC).
2. Menganalisa hasil simulasi dari penerapan metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada pengendalian pintu air.

1.5 Manfaat

Manfaat yang didapat dari penelitian tugas akhir ini adalah mendapatkan informasi tentang penerapan metode *Sliding Mode Control* (SMC) yang dapat digunakan sebagai masukan pada *microcontroller* untuk menrancang alat pengendali pintu air. Selain itu, penelitian ini juga dapat dipakai sebagai rujukan pada penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan Tugas Akhir ini disusun dalam lima bab. Secara garis besar masing-masing bab membahas hal-hal sebagai berikut :

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini terdapat hal-hal yang menjadi latar belakang permasalahan yang dapat memunculkan beberapa rumusan masalah. Masalah-masalah yang muncul dibatasi oleh beberapa asumsi. Selain itu, bab ini menjabarkan tujuan dan manfaat serta sistematika penulisan di Tugas Akhir ini.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan mengenai gambaran umum tentang sungai, model matematika *reservoir* dan pintu air serta gambaran umum tentang tempat yang dijadikan studi kasus pada Tugas Akhir ini. Selain itu, bagian ini juga membahas teori-teori tentang metode *Sliding Mode Control* yang mendukung penyelesaian Tugas Akhir ini.

3. BAB III METODE PENELITIAN

Pada bagian ini membahas langkah-langkah dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Selanjutnya dibentuk menjadi suatu diagram alir penelitian agar langkah-langkah yang telah dibuat dapat dengan mudah dipahami.

4. BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab IV membahas penyelesaian permasalahan yang telah dijelaskan pada bab I. Setelah itu, hasil dari pembahasan tersebut disimulasikan sehingga diketahui hasil pengendalian dengan metode *Sliding Mode Control* pada pintu air.

5. BAB V PENUTUP

Pada bagian terakhir dari Tugas Akhir ini diuraikan kesimpulan dari analisis dan pembahasan di bab IV. Kemudian diusulkan beberapa saran yang dapat digunakan sebagai referensi pada penelitian selanjutnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan tentang pustaka-pustaka yang mendukung penyelesaian tugas akhir ini. Pustaka-pustaka tersebut antara lain : gambaran umum tentang sungai, sodetan pelangwot, Model matematika *reservoir* dan pintu air, serta teori-teori tentang metode *Sliding Mode Control*.

2.1 Sungai

Sungai adalah aliran air yang besar dan memanjang yang mengalir secara terus-menerus dari hulu (sumber) menuju hilir (muara). Secara alami arah aliran sungai akan menuju ke laut atau tampungan air yang besar seperti danau sebagai muaranya. Fungsi utama dari sungai adalah mengalirkan air dan mengangkut sedimen hasil erosi pada daerah alirannya, yang keduanya berlangsung secara bersamaan dan saling mempengaruhi (Mulyanto, 2007). Air yang dialirkan oleh sungai umumnya berasal dari hujan, embun, mata air, limpasan bawah tanah, dan lelehan es atau salju di beberapa negara tertentu. Sedangkan sedimen hasil erosi berasal dari lereng-lereng di dataran tinggi yang terkikis dan hasil kikisannya dibawa serta dideposisikan ke dataran yang lebih rendah. Pada penampang memanjang, Sebuah sungai dapat dibagi menjadi beberapa bagian yang berbeda sifatnya (Mulyanto, 2007) yaitu :

1. Hulu sungai

Pada umumnya hulu sungai terdiri dari lereng-lereng yang curam dan kondisi geologinya merupakan lapisan batuan. Air hujan yang jatuh disini akan berkumpul

membentuk anak sungai kecil. Curamnya kelandaian aliran mengakibatkan tingginya kecepatan aliran yang mempunyai daya kikis dan kapasitas transport sedimen yang sangat besar.

2. Sungai *alluvial*

Sebagian material sedimen yang terbawa luapan air akan tetap tertinggal membentuk dataran yang disebut sebagai dataran *alluvial*. Sebagian material yang lain akan tetap mengalir membentuk sungai *alluvial*.

3. Sungai pasang surut atau *tidal river*

Sungai pasang surut merupakan sungai *alluvial* yang terpengaruh oleh pasang surut laut atau *tidal reach*. Pada bagian ini selalu terjadi perubahan secara periodik pada ketinggian muka airnya karena terpengaruh oleh pasang surut.

4. Muara sungai atau *estuary*

Muara sungai merupakan alur yang berbatasan langsung dengan laut pada garis pantai. Pada bagian ini terjadi dua arah aliran yaitu debit air tawar dari hulu ke hilir dan debit air laut pada saat pasang yang naik ke arah hulu.

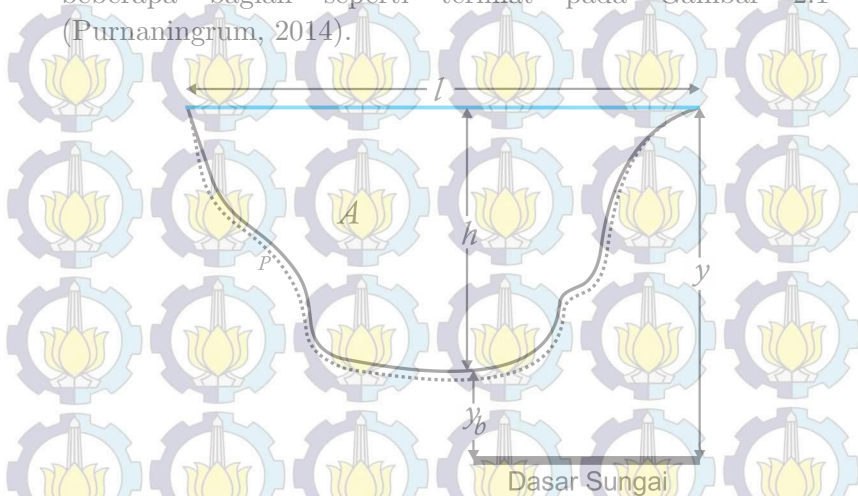
5. Mulut sungai atau *tidal inlet*

Mulut sungai merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan muara dimana terjadi interaksi antara gelombang laut dan aliran air yang melewati muara.

6. Delta sungai

Delta sungai berupa dataran yang terbentuk oleh sedimentasi pada muara dan mulut sungai.

Pada penampang melintang, suatu sungai memiliki beberapa bagian seperti terlihat pada Gambar 2.1 (Purnaningrum, 2014).



Gambar 2.1 : Penampang Melintang Sungai

Dengan l adalah lebar dari sungai, P adalah tampang basah, A adalah luas penampang sungai, y_b adalah ketinggian *bed slope* dan y adalah elevasi muka air sungai. h adalah ketinggian air sungai diukur dari permukaan *bed slope* ke permukaan sungai, hubungan dari y , y_b , dan h adalah $y = h + y_b$. Luas penampang dapat dihitung dengan persamaan $A = l \cdot h$.

2.2 Bendungan

Bendungan adalah konstruksi yang dibangun untuk menahan atau menampung air pada aliran sungai. Sebuah bendungan dapat berfungsi sebagai pembangkit listrik, sumber air irigasi, pengendali banjir, dan lain-lain. Pada umumnya bendungan dibagi menjadi dua jenis, yaitu bendungan tetap dan bergerak. Bendungan tetap hanya memiliki tempat penampungan air yang digunakan untuk

meninggikan muka air sungai pada ketinggian tertentu agar dapat dialirkan ke saluran irigasi. Sedangkan bendungan gerak memiliki beberapa bagian, yaitu *reservoir* yang digunakan untuk menampung air dan pintu air yang digunakan untuk mengalirkan air secara bertahap dan berkelanjutan sesuai yang diinginkan.

2.2.1 Model *Reservoir*

Pada *reservoir* diperoleh suatu model matematika yang didapatkan dari persamaan kontinuitas dengan mengasumsikan bahwa aliran air tidak elastis. Pada model *reservoir*, luas penampang sungai bergantung pada ketinggian air pada waktu tertentu yang dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.1 dan 2.2 (Zhou dkk., 2012).

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A[H(t)]} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (2.1)$$

$$Q_{out} = Q_P + Q_G \quad (2.2)$$

dengan

- H : Ketinggian *reservoir* (m)
- A : Luas penampang sungai (m^2)
- Q_{in} : Rata-rata aliran masuk *reservoir* (m^3/s)
- Q_{out} : Rata-rata aliran keluar *reservoir* (m^3/s)
- Q_P : Rata-rata aliran untuk produksi (m^3/s)
- Q_G : Rata-rata aliran yang melewati pintu air (m^3/s)

Model tersebut diterapkan pada *reservoir* yang digunakan pada kebutuhan tertentu seperti untuk pembangkit listrik atau irigasi. Sedangkan *reservoir* yang tidak digunakan pada kebutuhan tertentu dapat dikatakan bahwa :

$$Q_P = 0 \quad (2.3)$$

sehingga diperoleh :

$$Q_{out} = Q_G \quad (2.4)$$

2.2.2 Model Pintu Air

Pintu air digunakan untuk mengendalikan ketinggian air pada suatu *reservoir* secara bertahap dan berkelanjutan agar tetap pada kondisi yang aman. Sehingga tidak membahayakan bagi lingkungan sekitar dan dapat dimanfaatkan untuk keperluan tertentu. Model matematika dari pintu air dinyatakan oleh Persamaan 2.5 dan 2.6 (Zhou dkk., 2012).

$$Q_G = \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (2.5)$$

$$\Delta H = H - Z_D \quad (2.6)$$

dengan

- OP : Pembukaan pintu air (%)
- A_G : Total luas pintu air (m^2)
- g : Percepatan gravitasi (m^2/s)
- ΔH : Selisih muka air di hulu dan hilir (m)
- H : Ketinggian air di hulu sungai (m)
- Z_D : Ketinggian air di hilir sungai (m)

Koefisien debit ε adalah parameter yang dapat divariasikan dan diestimasi sehingga mendekati gerakan pintu air pada kenyataan.

2.3 Sodetan Pelangwot

Sungai Bengawan Solo merupakan sungai terpanjang di Pulau Jawa yang melintasi dua provinsi yaitu Jawa Tengah dan Jawa Timur. Sungai ini mempunyai arti penting sebagai sumber air yang sangat potensial bagi pertanian, perikanan, kehidupan organisme air, dan lain-lain. Wilayah hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Bengawan Solo saat ini sudah berada pada kondisi yang kritis. Curah hujan yang tinggi di sepanjang aliran sungai mengakibatkan Bengawan Solo ini tidak bisa menampung debit air yang sangat besar. Hujan dengan intensitas yang tinggi bisa mengakibatkan banjir dengan skala besar di hampir seluruh wilayah yang dilalui

sungai ini.

Untuk mengatasi banjir yang terus terjadi, beberapa modifikasi dilakukan di sepanjang sungai ini, seperti pembangunan waduk, bendungan, dan sodetan (*floodway*). Gambar 2.2 adalah salah satu contoh modifikasi yang terletak di kabupaten Lamongan yaitu pembuatan sodetan (*floodway*) yang berfungsi untuk mengalirkan debit air sungai Bengawan Solo langsung ke laut Jawa tanpa melalui muara utama sungai tersebut di daerah Ujung Pangkah, Gresik (Lusiana, 2011).



Gambar 2.2 : Peta Lokasi Sodetan Pelangwot

Pada Gambar 2.2, terdapat sungai utama yang merupakan aliran sungai Bengawan Solo yang mengarah ke daerah muara di Gresik. Sementara sodetan Pelangwot merupakan sungai terusan buatan yang mempunyai panjang sekitar 13 km dan lebar sekitar 100 m (Lusiana, 2011). Sodetan ini dibuat agar mampu mengalirkan debit air sungai Bengawan Solo sebesar $640 \text{ m}^3/\text{s}$ (Mudjib dan Lasmino, 2013). Akan tetapi, saat ini kapasitas sodetan tersebut turun

menjadi $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (Riyanto, 2013).



Gambar 2.3 : Pintu Air di Sodetan Pelangwot

Pada Gambar 2.3 terlihat bahwa sodetan Pelangwot memiliki pintu air dengan tiga daun pintu yang dapat dibuka-tutup secara manual. Ketika sungai utama tidak mampu menampung debit air yang sangat besar, maka pintu sodetan ini akan dibuka. Hal ini bisa membuat daerah hilir sodetan mengalami banjir seperti daerah hilir sungai utama pada saat hujan dengan intensitas ekstrim. Sehingga dibutuhkan sebuah pengendali otomatis di pintu air tersebut untuk mencegah banjir di salah satu maupun kedua daerah hilir tersebut.

2.4 Sistem Pengendalian

Sistem pengendalian adalah rangkaian komponen-komponen yang membentuk konfigurasi sistem yang akan menjaga output sebuah sistem menuju ke nilai yang diinginkan (Choudhury, 2005). Secara umum sistem kendali terbagi dalam 2 jenis, yaitu : sistem kendali klasik dan modern. Sistem kendali klasik berkaitan dengan *input* tunggal dan *output* tunggal (SISO) dengan dasar teori transformasi

Laplace dan penggunaannya digambarkan dalam diagram blok. Sedangkan sistem kendali modern berkaitan dengan banyak *input* dan *output* (MIMO) didasarkan pada variabel keadaan dalam hal persamaan differensial (Naidu, 2002). Sistem pengendalian mempunyai pengaruh sangat penting pada perkembangan ilmu dan teknologi. Disamping dibutuhkan pada pesawat ruang angkasa, sistem robot, dan sebagainya, sistem pengendalian juga menjadi bagian yang sangat penting bagi industri modern, Seperti sistem pengendalian kontrol tekanan, temperatur, kelembaban aliran dalam industri proses, dan lain-lain (Ogata, 2010). Beberapa elemen pada sistem kendali adalah sebagai berikut (Paraskevopoulos, 2001) :

1. *Reference input* adalah masukan sistem yang merupakan nilai *output* yang diinginkan.
2. *Error* adalah selisih antara *Reference input* dan *output* sistem.
3. *Control input* adalah pengatur dari parameter-parameter pada sistem yang akan dikontrol yang dapat disesuaikan secara dinamis.
4. *Disturbance input* adalah gangguan pada sistem yang mempengaruhi *control input* dan hasil dari pengendalian.
5. *Output* adalah hasil dari sistem yang telah dikontrol oleh *control input*.

Dalam perkembangannya, teori pengendalian berkembang menjadi banyak metode. Beberapa diantaranya adalah *Proportional controller*, *Integral controller*, *Derivative controller*, *ProportionalIntegralDerivative controller* (PID), *Sliding Mode Control* (SMC), *Fuzzy Logic Control* (FLC),

Linear-Quadratic Regulator (LQR), *Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)*, dan lain-lain. Dalam tugas akhir ini, metode *Sliding Mode Control (SMC)* digunakan untuk mendesain pengendali otomatis pada pintu air tersebut.

2.5 *Sliding Mode Control (SMC)*

Sliding Mode Control (SMC) merupakan salah satu metode pengendalian sistem melalui aplikasi dari kendali pensaklaran (*switching*) berfrekuensi tinggi. Metode ini memiliki konsep pengendalian berdasarkan pemodelan yang hanya berdasarkan pada estimasi terbatas. Sehingga metode ini cukup tangguh saat digunakan pada sistem yang memiliki ketidakpastian (Herlambang, 2010). Metode ini memiliki kekurangan yang salah satunya adalah munculnya *chattering* yaitu osilasi keluaran pengendali dengan frekuensi tinggi yang disebabkan oleh *switching* yang sangat cepat untuk membentuk *sliding mode*, sehingga dapat mempengaruhi kestabilan sistem. Untuk mencegah terjadinya *chattering* ini, biasanya metode tersebut menerapkan suatu *boundary layer* (BL) pada permukaan *sliding* (Rizan, 2008).

2.5.1 *Fungsi Switching*

Pandang suatu sistem dinamis (Herlambang, 2010) :

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(\mathbf{x}, t) + b(\mathbf{x}, t) \cdot u + d(t) \quad (2.7)$$

dimana u adalah *control input*, \mathbf{x} merupakan vektor keadaan, $f(x, t)$ dan $b(x, t)$ berupa fungsi terbatas, $d(t)$ gangguan eksternal. Jika x_d merupakan x yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh :

$$e(t) = x(t) - x_d(t) \quad (2.8)$$

Fungsi *switching* memenuhi persamaan (Herlambang, 2010) :

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (2.9)$$

dengan λ berupa konstanta positif dan n merupakan orde dari sistem. Fungsi *switching* ini akan digunakan untuk menentukan besarnya nilai u yang merupakan suatu *control input* sehingga dapat memenuhi kondisi *sliding*.

Jika nilai $S(x, t) = 0$, maka fungsi *switching* diatas dapat disebut sebagai permukaan *sliding* (*sliding surface*). Permukaan *sliding* berupa garis yang merupakan komponen penting dari SMC sebagai tempat trayektori keadaan meluncur dari kondisi awal menuju keadaan yang diinginkan (Herlambang, 2010).

2.5.2 Kondisi *Sliding*

Perancangan *control law* pada metode SMC dilakukan sedemikian hingga $e(t)$ bergerak menuju permukaan *sliding* dan meluncur pada permukaan tersebut untuk semua $t \geq 0$. Untuk menentukan *control law* agar sistem tetap pada permukaan *sliding*, maka dapat digunakan fungsi yang mirip dengan fungsi Lyapunov yang dinyatakan oleh (Herlambang, 2010) :

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.10)$$

dengan $V(0) = 0$ dan $V > 0$ untuk $S = 0$. Kondisi kestabilan sistem didefinisikan sebagai turunan pertama dari persamaan diatas, sehingga diperoleh (Herlambang, 2010) :

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (2.11)$$

Pertidaksamaan 2.11 disebut kondisi *sliding* yang dapat dinyatakan sebagai :

$$\dot{S}sgn(S) \leq -\eta \quad (2.12)$$

dengan η merupakan konstanta positif dan fungsi *sgn* (signum) didefinisikan sebagai :

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & \text{untuk } x < 0 \\ 0, & \text{untuk } x = 0 \\ 1, & \text{untuk } x > 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

2.5.3 Perancangan *Sliding Mode Control* (SMC)

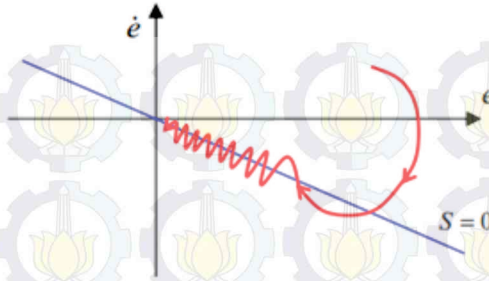
Langkah-langkah untuk mendesain pengendalian dengan metode SMC adalah sebagai berikut (Herlambang, 2010) :

1. Menentukan fungsi *Switching* $S(x, t)$ dari tracking error sistem dinamik
2. Menentukan permukaan *sliding*, yaitu $S(x, t) = 0$ dari fungsi switching yang telah diperoleh
3. Menentukan nilai estimasi pengendali \hat{u} pada saat dinamika dalam kondisi sliding $\dot{S} = 0$
4. Mendefinisikan aturan SMC yaitu penggunaan *control law*,

$$u = \hat{u} - K \text{sgn}(S) \quad (2.14)$$
5. Substitusi nilai \hat{u} pada persamaan point (4) sehingga diperoleh *control input* baru
6. Menentukan nilai K yang sesuai dengan kondisi *sliding*.

2.5.4 *Sliding Mode Control* dengan *Boundary Layer*

Munculnya *chattering* merupakan salah satu kekurangan dari metode SMC yang dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem. Pada Gambar 2.4 menggambarkan kondisi *chattering* dimana trayektori keadaan sistem berupa osilasi dan tidak menuju ke titik asal bidang (Rizan, 2008).



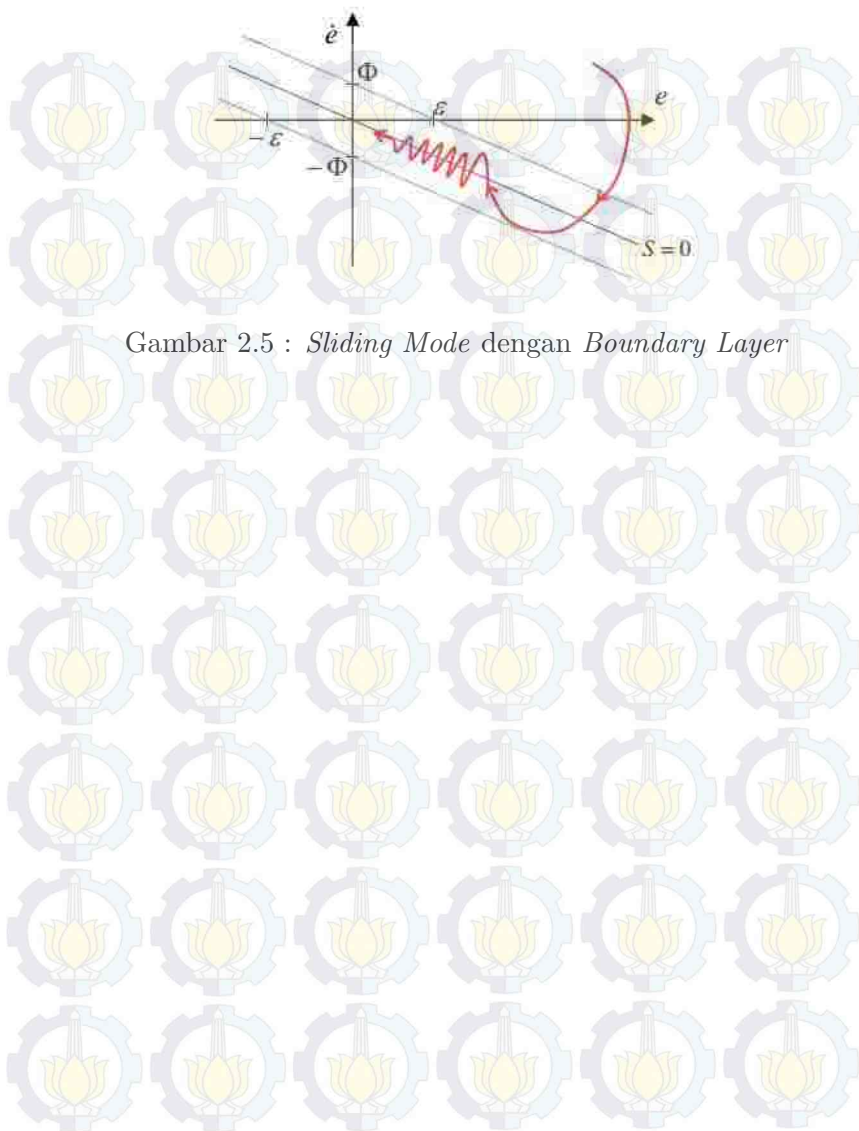
Gambar 2.4 : Kondisi Chattering

Untuk mencegah ketidakstabilan, pada SMC diterapkan suatu *boundary layer* (BL) pada permukaan *sliding* yang memperhalus dinamika *control input* u dan memastikan bahwa sistem berada pada *layer*. Lebar dari BL dinyatakan sebagai 2Φ . Diasumsikan bahwa $|S|$ sebagai jarak antara keadaan e dan garis *sliding* $S = 0$, maka vektor keadaan e berada di dalam BL jika $|S| \leq \Phi$, dan berada di luar jika $|S| > \Phi$ (Rizan, 2008).

Penggunaan BL pada Persamaan 2.14 dilakukan dengan cara mengganti fungsi $sgn(S)$ dengan $sat(S/\Phi)$ (Herlambang, 2010). Fungsi sat (saturasi) didefinisikan sebagai :

$$sat(x) = \begin{cases} x, & \text{jika } |x| < 1 \\ sgn(x), & \text{jika } |x| \geq 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

Kondisi sliding pada SMC dengan *boundary layer* pada Gambar 2.5 menunjukkan bahwa trayektori keadaan sistem bergerak dan berosilasi di sekitar permukaan *sliding* di dalam *boundary layer*. Konsep BL ini dapat mengurangi besarnya osilasi pada *chattering* sehingga sistem tetap stabil dengan Φ menyatakan ketebalan *boundary layer* (Rizan, 2008).



Gambar 2.5 : *Sliding Mode* dengan *Boundary Layer*

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini diuraikan langkah-langkah sistematis yang dilakukan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir. Selain itu, terdapat pula diagram alir penelitian untuk lebih mempermudah memahami langkah-langkah tersebut.

3.1 Tahap Penelitian

Dalam melakukan penelitian pada tugas akhir ini, ada beberapa tahap yang dilakukan antara lain :

1. Studi literatur
Pada tahap ini dilakukan identifikasi permasalahan dan pengumpulan informasi tentang teori-teori yang menunjang penyelesaian tugas akhir ini seperti model yang ada pada sistem pintu air bendungan, konsep dasar metode *Sliding Mode Control* (SMC). dan lain-lain. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan pencarian penelitian serupa yang terdahulu yang dapat dijadikan referensi atau rujukan pada tugas akhir ini.
2. Pemodelan sistem pintu air
Pada tahap ini dilakukan proses pemodelan pada sistem pintu air yang diambil dari komponen-komponen penyusunnya. Sehingga diperoleh persamaan differensial dH/dt baru yang disebut sebagai model sistem pintu air yang digunakan pada tahap selanjutnya.
3. Desain kendali pintu air
Pada tahap ini dilakukan desain kendali pintu air pada model yang sudah didapatkan dengan metode SMC

dengan menentukan *tracking error* dan fungsi *switching*. Dari fungsi tersebut, ditentukan permukaan *sliding*-nya. Kemudian dicari nilai estimasi pengendali \hat{u} yang dapat disubstitusikan pada persamaan *control law*. Nilai K pada *control law* harus dirancang agar memenuhi pertidaksamaan 2.11.

4. Simulasi desain kendali

Setelah mendapatkan desain sistem kendali, model tersebut disimulasikan dengan menggunakan *software* Matlab sehingga didapatkan grafik dari sistem pengendalian pintu air. Simulasi ini bertujuan agar hasil penelitian lebih mudah dipahami.

5. Analisa hasil simulasi

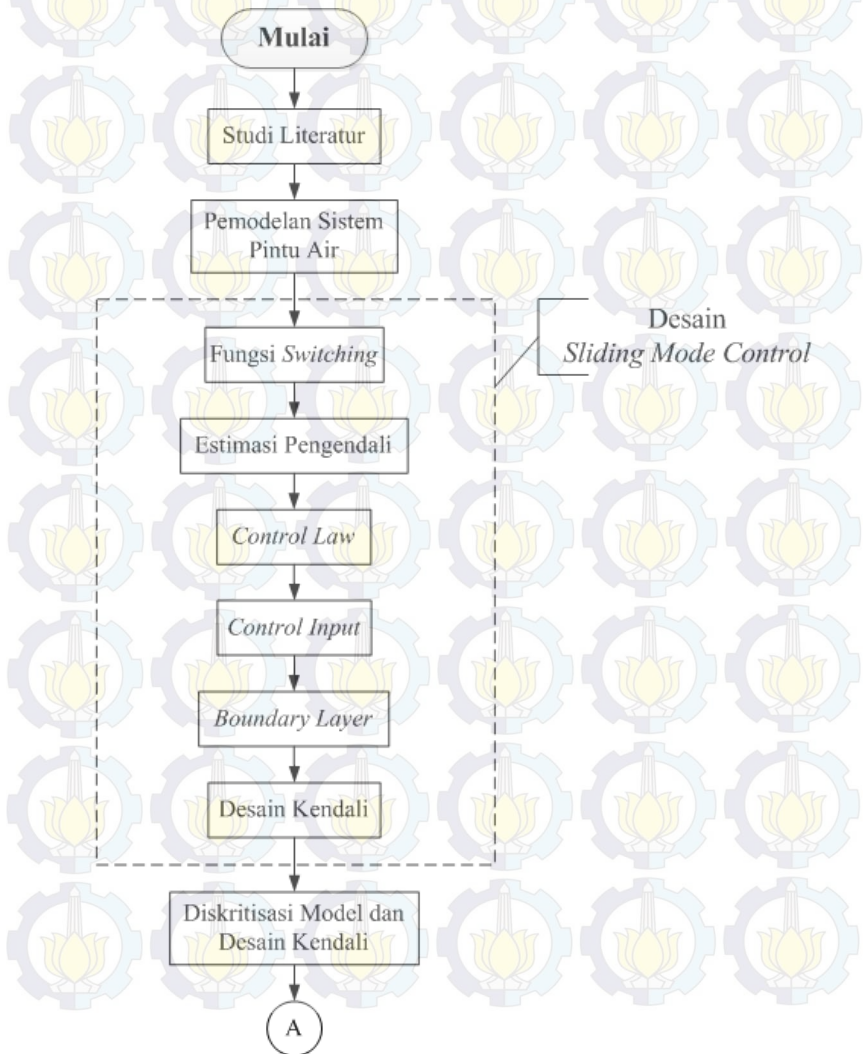
Pada tahap ini dilakukan analisa hasil pada simulasi yang sudah dilakukan dengan bantuan *software* Matlab. Tahap ini sebagai dasar untuk menyimpulkan hasil penelitian.

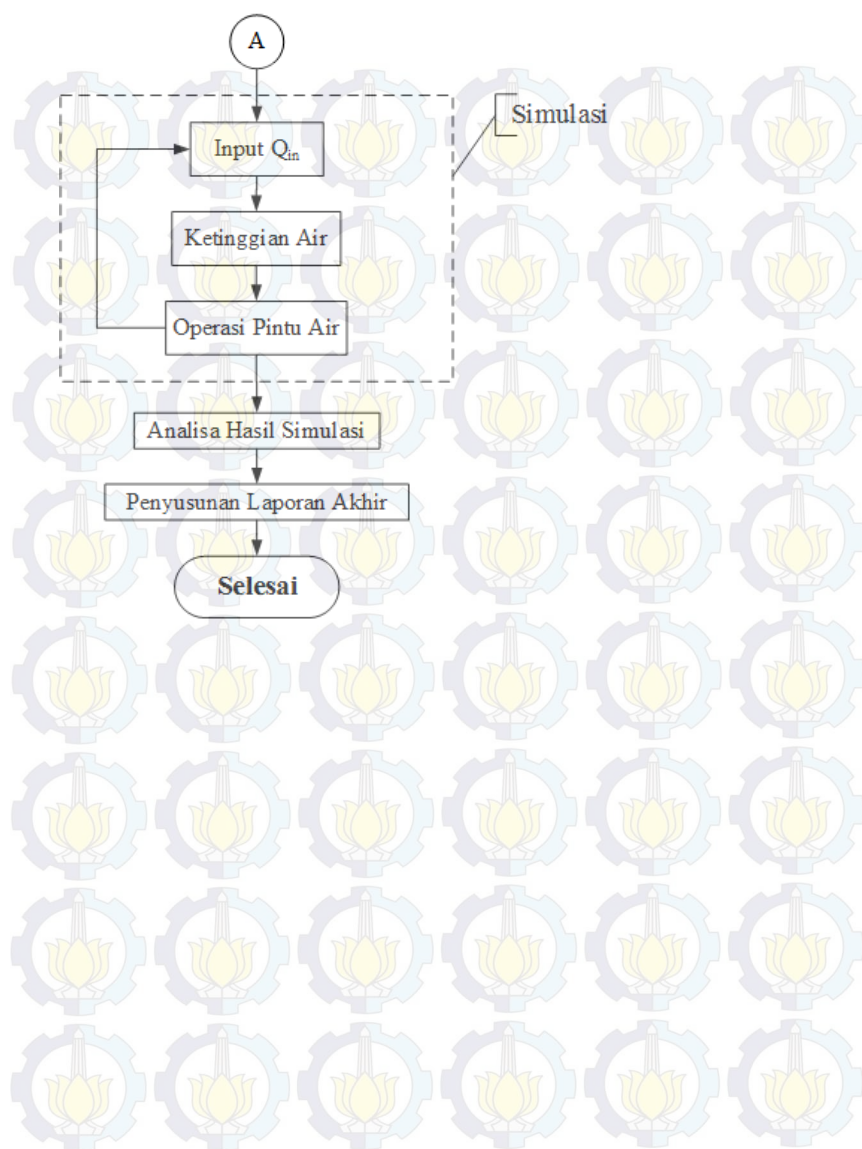
6. Penyusunan laporan akhir

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah penyusunan laporan akhir yang berisi tentang desain sistem kendali, hasil simulasi, kesimpulan, dan saran.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Tahap penelitian diatas dapat dibuat suatu diagram alir sebagai berikut :





BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas tentang bagaimana memperoleh kendali pintu air dengan metode *Sliding Mode Control* (SMC). Pembahasan dimulai dengan memodelkan sistem pintu air dari persamaan-persamaan yang telah ada di bab II kemudian dicari kendalinya sesuai aturan pada metode SMC. Setelah itu, kendali tersebut disimulasikan dengan *software* Matlab agar diketahui karakteristik metode SMC dalam mengoperasikan pintu air dan mengatasi banjir yang telah terjadi.

4.1 Pemodelan Matematika Sistem Pintu Air

Pintu air merupakan salah satu alat yang digunakan untuk menahan laju aliran sungai sehingga ketinggian air pada suatu sungai dapat diatur sedemikian rupa agar tidak mengganggu kehidupan di sekitar dan dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan tertentu, Seperti irigasi, bahan baku air minum, dan lain-lain. Pintu air juga dapat digunakan untuk mengendalikan banjir di sekitar aliran suatu sungai.

Pada saat pintu air tertutup, air sungai akan tertahan pada suatu tempat penampungan yang bisa disebut sebagai *reservoir*. Ketika ketinggian air berada pada kondisi yang tidak aman, pintu air akan dibuka sesuai kebutuhan agar ketinggian air kembali pada posisi yang aman. Pada pengendalian pintu air, ketinggian air setelah melewati pintu air dianggap konstan untuk mencegah meluapnya air sungai pada area setelah pintu air.

Pada bab sebelumnya, model *reservoir* dinyatakan pada

Persamaan 4.1 dan 4.2.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A[H(t)]} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (4.1)$$

$$Q_{out} = Q_G \quad (4.2)$$

dan model pintu air dinyatakan pada Persamaan 4.3 dan 4.4.

$$Q_G = \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (4.3)$$

$$\Delta H = H - Z_D \quad (4.4)$$

dengan

- H : Ketinggian air sebelum melewati pintu air (m)
- A : Luas penampang sungai (m²)
- Q_{in} : Rata-rata aliran masuk *reservoir* (m³/detik)
- Q_{out} : Rata-rata aliran keluar *reservoir* (m³/detik)
- Q_G : Rata-rata aliran yang melewati pintu air (m³/detik)
- OP : Pembukaan pintu air (%)
- A_G : Total luas pintu air (m²)
- g : Percepatan gravitasi (m²/detik)
- ΔH : Selisih ketinggian air sebelum dan sesudah pintu air (m)
- Z_D : Ketinggian air setelah melewati pintu air (m)

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.2) ke Persamaan (4.1), maka diperoleh :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A[H(t)]} (Q_{in} - Q_G) \quad (4.5)$$

Selanjutnya Persamaan (4.3) dan (4.4) disubstitusikan ke Persamaan (4.5), sehingga didapatkan :

$$\dot{H}(t) = \frac{1}{A[H(t)]} \left(Q_{in}(t) - \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H(t) - Z_D)} \right) \quad (4.6)$$

Persamaan (4.6) dapat ditulis menjadi :

$$\dot{H}(t) = \frac{1}{A[H(t)]} \left(Q_{in}(t) - b \cdot OP \cdot \sqrt{H(t) - Z_D} \right) \quad (4.7)$$

dengan $b = \varepsilon \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g}$.

Persamaan (4.7) merupakan model sistem pintu air yang digunakan pada Tugas Akhir ini.

4.2 Desain Kendali Pintu Air Dengan Metode SMC

Dynamic SMC mempunyai performansi yang lebih baik daripada *static* SMC (Herlambang, 2010). Sehingga pada Tugas Akhir ini digunakan metode *dynamic* SMC dengan cara menaikkan satu orde lebih banyak pada sistem dinamis yang telah ada.

Sistem dinamis (4.6) dan (4.7) merupakan persamaan beorde satu, sehingga order persamaan tersebut dinaikkan menjadi orde dua agar memenuhi syarat *dynamic* SMC. Misalkan H_d merupakan H yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh :

$$e = H - H_d \quad (4.8)$$

$$\dot{e} = \dot{H} - \dot{H}_d \quad (4.9)$$

Karena H_d konstan, maka $\dot{H}_d = 0$, sehingga Persamaan (4.9) menjadi :

$$\dot{e} = \dot{H} \quad (4.10)$$

Fungsi *switching* didefinisikan oleh :

$$\begin{aligned} S &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{2-1} e \\ &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e \\ &= \dot{e} + \lambda e \end{aligned} \quad (4.11)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.8) dan (4.10) ke Persamaan (4.11) diperoleh :

$$S = \dot{H} + \lambda(H - H_d) \quad (4.12)$$

Sehingga turunan pertama dari S adalah :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \ddot{H} + \lambda(\dot{H} - \dot{H}_d) \\ &= \ddot{H} + \lambda\dot{H} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Turunan dari fungsi H dapat diperoleh dengan menurunkan sekali lagi Persamaan (4.7) sehingga diperoleh :

$$\ddot{H} = \frac{1}{AH} \left(\dot{Q}_{in} - \frac{b OP \dot{H}}{2\sqrt{H - Z_D}} \right) - \frac{\dot{H}}{AH^2} \left(Q_{in} - b OP \sqrt{H - Z_D} \right) \quad (4.14)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.7) dan (4.14) ke Persamaan (4.13) diperoleh :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \frac{1}{AH} \left(\dot{Q}_{in} - \frac{b OP \dot{H}}{2\sqrt{H - Z_D}} \right) - \frac{\dot{H}}{AH^2} \left(Q_{in} - b OP \sqrt{H - Z_D} \right) \\ &\quad + \lambda \left(\frac{1}{AH} \left(Q_{in} - b OP \sqrt{H - Z_D} \right) \right) \\ &= \frac{\dot{Q}_{in}}{AH} - \frac{b OP \dot{H}}{2AH\sqrt{H - Z_D}} - \frac{Q_{in}\dot{H}}{AH^2} + \frac{b OP \dot{H}\sqrt{H - Z_D}}{AH^2} \\ &\quad + \frac{\lambda Q_{in}}{AH} - \frac{\lambda b OP \sqrt{H - Z_D}}{AH} \\ &= \frac{1}{AH} \left(\dot{Q}_{in} - \frac{Q_{in}\dot{H}}{H} + \lambda Q_{in} \right) - \frac{b OP}{AH} \left(\frac{\dot{H}}{2\sqrt{H - Z_D}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\dot{H}\sqrt{H - Z_D}}{H} + \lambda\sqrt{H - Z_D} \right) \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{AH} \left(\frac{H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in}}{H} \right) - \frac{b}{AH} \left(\frac{H\dot{H}}{2H\sqrt{H-Z_D}} - \frac{2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D)}{2H\sqrt{H-Z_D}} \right) \quad (4.15)$$

Selanjutnya ditentukan nilai estimasi pengendali \widehat{OP} yang diperoleh dari Persamaan (4.15) dengan nilai $\dot{S} = 0$, sehingga diperoleh :

$$\frac{1}{AH} \left(\frac{H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in}}{H} \right) - \frac{b}{AH} \left(\frac{H\dot{H} - 2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D)}{2H\sqrt{H-Z_D}} \right) = 0$$

atau dapat ditulis menjadi :

$$\begin{aligned} \frac{1}{AH} \left(\frac{H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in}}{H} \right) &= \frac{b}{AH} \left(\frac{H\dot{H} - 2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D)}{2H\sqrt{H-Z_D}} \right) \\ \frac{H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in}}{H} &= b \left(\frac{H\dot{H} - 2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D)}{2H\sqrt{H-Z_D}} \right) \\ H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in} &= b \left(\frac{H\dot{H} - 2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D)}{2\sqrt{H-Z_D}} \right) \\ OP &= \frac{2\sqrt{H-Z_D} (H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in})}{b (H\dot{H} - 2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D))} \\ \widehat{OP} &= \frac{2\sqrt{H-Z_D} (H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in})}{b (H\dot{H} - 2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D))} \quad (4.16) \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.16) ke persamaan *control law*,

$$OP = \widehat{OP} - K \operatorname{sgn}(S)$$

diperoleh :

$$OP = \frac{2\sqrt{H-Z_D} (H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in})}{b (H\dot{H} - 2\dot{H}(H-Z_D) + 2\lambda H(H-Z_D))} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (4.17)$$

Misalkan :

$$x = H\dot{Q}_{in} - Q_{in}\dot{H} + \lambda H Q_{in} \quad (4.18)$$

$$y = H\dot{H} - 2\dot{H}(H - Z_D) + 2\lambda H(H - Z_D) \quad (4.19)$$

maka Persamaan (4.17) dapat ditulis menjadi :

$$OP = \frac{2x\sqrt{H - Z_D}}{b y} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (4.20)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.18), (4.19), dan (4.20) ke Persamaan(4.15) akan didapatkan :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \frac{1}{AH} \left(\frac{x}{H} \right) - \frac{b}{AH} \left(\frac{y}{2H\sqrt{H - Z_D}} \right) \left(\frac{2x\sqrt{H - Z_D}}{b y} - K \operatorname{sgn}(S) \right) \\ &= \frac{x}{AH^2} - \frac{b y}{2AH^2\sqrt{H - Z_D}} \left(\frac{2x\sqrt{H - Z_D}}{b y} - K \operatorname{sgn}(S) \right) \\ &= \frac{x}{AH^2} - \frac{x}{AH^2} + \frac{b y K \operatorname{sgn}(S)}{2AH^2\sqrt{H - Z_D}} \\ &= \frac{b y K \operatorname{sgn}(S)}{2AH^2\sqrt{H - Z_D}} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Selanjutnya akan ditentukan nilai K agar memenuhi kondisi *sliding* dengan cara mensubstitusikan Persamaan (4.21) ke persamaan :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S|$$

sehingga didapatkan :

$$\begin{aligned} S \left(\frac{b y K \operatorname{sgn}(S)}{2AH^2\sqrt{H - Z_D}} \right) &\leq -\eta|S| \\ \frac{S}{|S|} \left(\frac{b y K \operatorname{sgn}(S)}{2AH^2\sqrt{H - Z_D}} \right) &\leq -\eta \\ \operatorname{sgn}(S) \left(\frac{b y K \operatorname{sgn}(S)}{2AH^2\sqrt{H - Z_D}} \right) &\leq -\eta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{b y K}{2AH^2\sqrt{H-Z_D}} &\leq -\eta \\
b y K &\leq -2\eta AH^2\sqrt{H-Z_D} \\
K &\leq -\frac{2\eta AH^2\sqrt{H-Z_D}}{b y} \quad (4.22)
\end{aligned}$$

Dari Persamaan (4.22) dapat diperoleh nilai K sebagai berikut :

$$K = \min \left(-\frac{2\eta AH^2\sqrt{H-Z_D}}{b y} \right) \quad (4.23)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.23) ke Persamaan (4.20) diperoleh :

$$OP = \frac{2x\sqrt{H-Z_D}}{b y} - \min \left(-\frac{2\eta AH^2\sqrt{H-Z_D}}{b y} \right) sgn(S) \quad (4.24)$$

Untuk meminimalkan *chattering*, maka digunakan suatu *boundary layer* dengan cara mengganti fungsi $sgn(S)$ menjadi $sat(S/\Phi)$. Sehingga diperoleh desain kendali pintu air sebagai berikut :

$$OP = \frac{2x\sqrt{H-Z_D}}{b y} - \min \left(-\frac{2\eta AH^2\sqrt{H-Z_D}}{b y} \right) sat(S/\Phi) \quad (4.25)$$

4.3 Simulasi dan Hasil

Setelah diperoleh desain kendali dengan metode SMC, pengoperasian pintu air akan disimulasikan menggunakan *software* Matlab. Untuk mempermudah penulisan di Matlab, Persamaan (4.7) akan didiskritisasi dengan menggunakan metode beda hinga sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned}
\frac{H(t+1) - H(t)}{\Delta t} &= \frac{1}{A H(t)} \left(Q_{in}(t) - b OP(t) \sqrt{H(t) - Z_D} \right) \\
H(t+1) &= H(t) + \frac{\Delta t}{A H(t)} \left(Q_{in}(t) - b OP(t) \sqrt{H(t) - Z_D} \right)
\end{aligned}$$

Persamaan-persamaan yang ditulis pada Matlab untuk simulasi pengoperasian pintu air adalah sebagai berikut :

$$H(t+1) = H(t) + \frac{\Delta t}{A H(t)} \left(Q_{in}(t) - b OP(t) \cdot \sqrt{H(t) - Z_D} \right)$$

$$x(t+1) = H(t+1) \dot{Q}_{in}(t+1) + \lambda H(t+1) Q_{in}(t+1) - Q_{in}(t+1) \dot{H}(t+1)$$

$$y(t+1) = H(t+1) \dot{H}(t+1) - 2\dot{H}(t+1)(H(t+1) - Z_D) + 2\lambda H(t+1)(H(t+1) - Z_D)$$

$$OP(t+1) = \frac{2x(t+1)\sqrt{H(t+1) - Z_D}}{b y(t+1)} - \min \left(\frac{-2\eta A H(t+1)^2 \sqrt{H(t+1) - Z_D}}{b y(t+1)} \right) \cdot \text{sat} \left(\frac{S(t+1)}{\Phi} \right)$$

Nilai dari $\dot{Q}_{in}(t+1)$ dan $\dot{H}(t+1)$ dapat diperoleh dengan metode beda hingga sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{in}(t+1) = \frac{Q_{in}(t+1) - Q_{in}(t)}{\Delta t}$$

$$\dot{H}(t+1) = \frac{H(t+1) - H(t)}{\Delta t}$$

Simulasi pada Tugas Akhir ini menggunakan masukan data debit air dengan selang waktu per jam dari pengamatan operasi Bendung Gerak Babat yang dilakukan oleh Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta 1. Penggunaan data tersebut bertujuan untuk melihat karakteristik dari metode SMC pada pengoperasian pintu air ketika terjadi

perubahan debit air secara wajar. Selain itu, masukan pada simulasi tersebut akan dimodifikasi secara acak dengan nilai yang cukup besar dan perubahan yang lebih signifikan sehingga karakteristik metode SMC dapat terlihat lebih jelas.

Selain debit air, pada simulasi dibutuhkan beberapa nilai parameter yang ditentukan. Sebagian dari nilai-nilai itu diperoleh dari profil sodetan (*floodway*) Pelangwot. Nilai parameter yang digunakan dapat dilihat pada tabel Tabel 4.1 .

Tabel 4.1 : Nilai Parameter yang Dibutuhkan pada Simulasi

Keterangan	Simbol	Nilai	Satuan
Gravitasi Bumi	g	9.8	m/s^2
Parameter yang divariasikan	ε	10	
Kontanta positif λ	λ	1	
Kontanta positif η	η	0.1	
Selang waktu	Δt	1	jam
<i>Boundary layer</i>	Φ	1×10^{-8}	
Ketinggian maksimal <i>Reservoir</i>	H_{max}	10	m
Ketinggian setelah pintu air	Z_D	3	m
Lebar sungai	l	37.5	m
Total luas pintu air	A_g	185,625	m^2

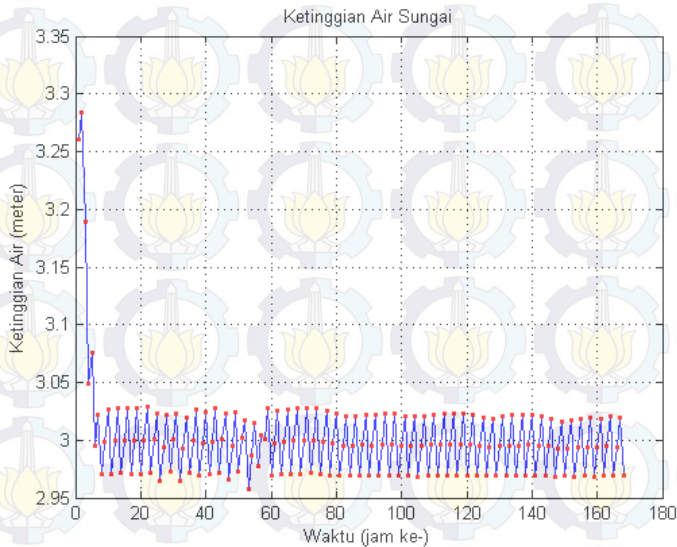
Sumber : Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta 1

Pengendalian dengan metode SMC diharapkan dapat mengoperasikan pintu air. Sehingga pintu air tersebut mampu mengatasi banjir yang terjadi secara otomatis tanpa pengawasan manusia.

4.3.1 Debit Air Musim Kemarau

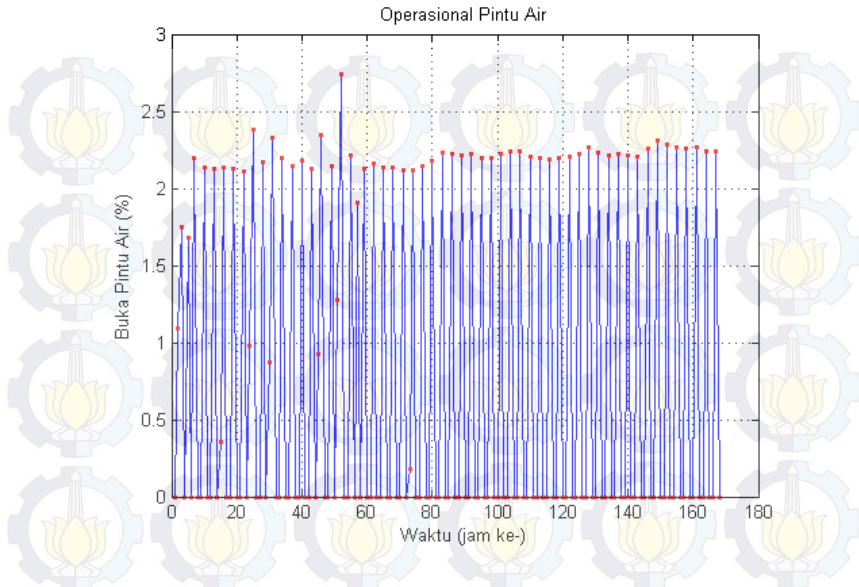
Simulasi pada bagian ini menggunakan data debit air Tabel A.1 (Lampiran A) sebagai inputan. Data tersebut

dimulai dari jam 01.00 pada tanggal 06 Oktober 2014 dan berakhir pada jam 24.00 pada tanggal 06 Oktober 2014. Pada awal data di Tabel A.1, ketinggian air bernilai 3.26 meter dengan pintu tertutup total. Sehingga diperoleh nilai awal $H(1) = 3.26$ meter dan $OP(1) = 0\%$ yang akan digunakan dalam simulasi pengoperasian pintu air pada musim Kemarau. Grafik ketinggian air sungai sebelum pintu air pada musim Kemarau dapat terlihat pada Gambar 4.1 .



Gambar 4.1 : Ketinggian Air Sungai pada Musim Kemarau

Berdasarkan Gambar 4.1 , ketinggian air sungai sebelum pintu air berada pada kisaran 3 meter yang merupakan nilai Z_D di simulasi Tugas Akhir ini. Hal ini dikarenakan debit air sungai bernilai sangat kecil, yaitu kurang dari $10 \text{ m}^3/\text{detik}$ di tiap jam. Sedangkan grafik pengoperasian pintu air pada musim Kemarau tampak pada Gambar 4.2 .



Gambar 4.2 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau

Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa pintu air terbuka dengan persentase maksimal kurang dari 3% dan sebagian besar tertutup pada waktu tertentu. Hal ini dikarenakan bahwa debit air yang masuk ke pintu air relatif kecil. Selain itu, Gambar 4.2 juga memperlihatkan bahwa pengoperasian pintu air mengikuti perubahan ketinggian air sebelum pintu air. Ketika ketinggian air sebelum pintu air turun maka pengoperasian pintu air juga akan turun dan sebaliknya. Tetapi saat ketinggian air sebelum pintu air kurang dari Z_D , pintu air tertutup maksimal.

Perbandingan ketinggian sungai sebelum pintu air dan persentase pengoperasian pintu air pada musim kemarau dapat terlihat pada Tabel 4.2 .

Tabel 4.2 : Hasil Simulasi Pengendalian Pintu Air pada
Musim Kemarau

Jam ke-	Ketinggian Air (m)	Pengoperasian Pintu Air (%)	Debit (m ³ /detik)	
			Masuk	Keluar
1	3.26	0.00	9.46	0.00
2	3.28	1.09	9.38	47.72
3	3.19	1.75	9.30	62.62
4	3.05	0.00	9.30	0.00
5	3.08	1.68	9.29	38.01
6	2.99	0.00	9.21	0.00
7	3.02	2.19	9.27	26.86
8	2.97	0.00	9.34	0.00
9	3.00	0.00	9.41	0.00
10	3.03	2.13	9.45	28.80
11	2.97	0.00	9.50	0.00
12	3.00	0.00	9.55	0.00
13	3.03	2.13	9.61	29.04
14	2.97	0.00	9.59	0.00
15	3.00	0.35	9.59	0.29
16	3.03	2.13	9.52	29.16
17	2.97	0.00	9.52	0.00
18	3.00	0.00	9.52	0.00
19	3.03	2.13	9.60	29.02
20	2.97	0.00	9.60	0.00
21	3.00	0.00	9.67	0.00
22	3.03	2.11	9.67	29.28
23	2.97	0.00	9.67	0.00
24	3.00	0.98	9.67	2.31

Tabel 4.2 merupakan hasil pengoperasian pintu air pada 24 jam awal simulasi. Pada Tabel 4.2 tampak bahwa ketinggian air sungai sebelum pintu air pasti mengalami

penurunan saat debit keluar lebih besar daripada debit masuk dan sebaliknya. Sementara itu, pintu air akan terbuka 0% (tertutup total) saat ketinggian air sungai sebelum pintu air kurang dari 3 meter yang merupakan nilai Z_D pada Tugas Akhir ini.

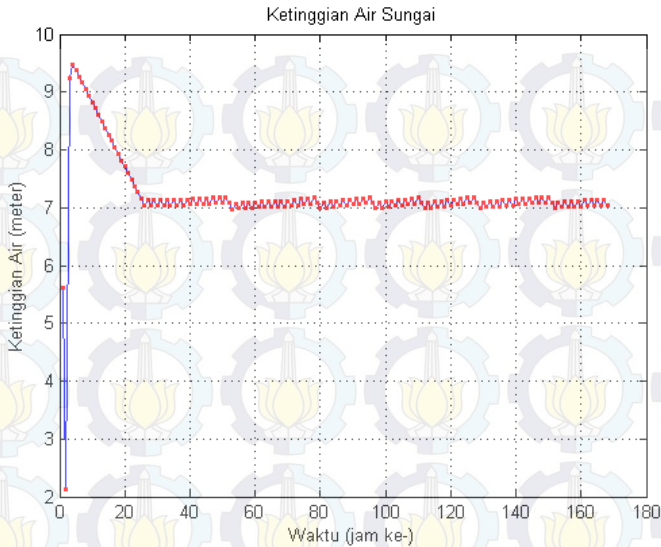
4.3.2 Debit Air Musim Hujan

Pada bagian ini, simulasi pengoperasian pintu air menggunakan data debit air Tabel A.2 (Lampiran A) sebagai inputan. Data tersebut dimulai dari jam 01.00 pada tanggal 12 Januari 2014 dan berakhir pada jam 24.00 pada tanggal 06 Januari 2014. Pada awal data di Tabel A.2, ketinggian air sungai berada pada kisaran 5.62 meter dan pintu air terbuka setinggi 2.80 meter. Sehingga diperoleh nilai awal $H(1) = 5.62$ meter yang akan digunakan dalam simulasi pengoperasian pintu air pada musim Hujan. Sedangkan untuk memperoleh nilai $OP(1)$, nilai pembukaan awal pintu air akan diubah dalam bentuk persentase terhadap pembukaan pintu air maksimal sebesar 7 meter, yaitu :

$$OP(1) = \frac{2.80}{7} \times 100\% = 40\% \quad (4.26)$$

Grafik ketinggian air sungai sebelum pintu air pada musim Hujan dapat terlihat pada Gambar 4.3 .

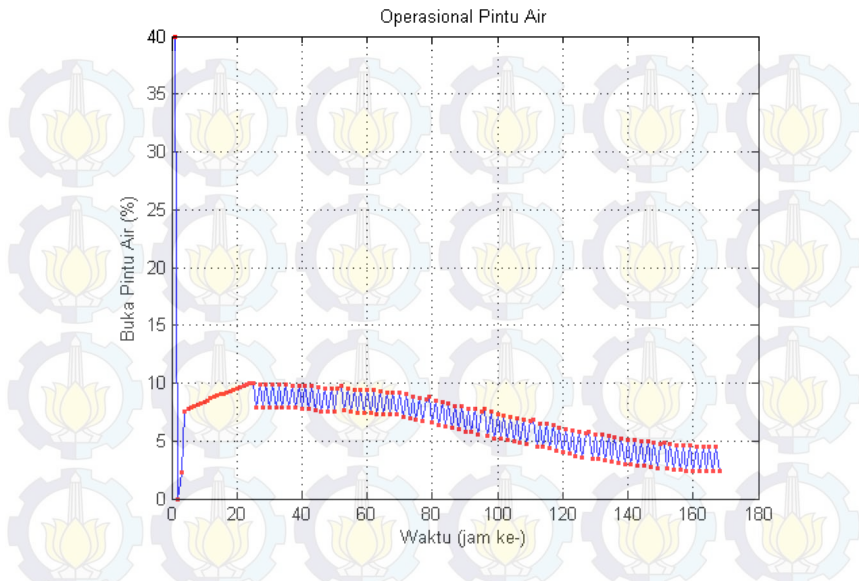
Pada Gambar 4.3 tampak bahwa ketinggian air sungai sebelum pintu air dikontrol oleh pengendali SMC pada kisaran 7 meter yang merupakan nilai ketinggian air yang diinginkan pada Tugas Akhir ini. Gambar 4.3 memperlihatkan bahwa ketinggian air sungai sebelum pintu air masih dalam rentang yang aman jika dibandingkan dengan ketinggian maksimal sebesar 10 meter pada musim Hujan.



Gambar 4.3 : Ketinggian Air Sungai pada Musim Hujan

Sedangkan grafik pengoperasian pintu air pada musim Hujan terlihat pada Gambar 4.4 .

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa pintu air terbuka pada kisaran 0-10%. Hanya pada nilai awal yang jauh lebih tinggi dan pada jam ke-2 sampai ke-3 yang kurang dari 5%. Dari Gambar 4.4 tampak bahwa pengoperasian pintu air mengikuti perubahan ketinggian air sebelum pintu air. Ketika ketinggian air sebelum pintu air turun maka pengoperasian pintu air juga akan turun dan sebaliknya. Hal ini untuk mempertahankan ketinggian air sungai sebelum pintu air pada ketinggian 7 meter yang merupakan nilai H_d (ketinggian air sebelum pintu air yang diinginkan).



Gambar 4.4 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan

Perbandingan ketinggian air sungai sebelum pintu air dan persentase pengoperasian pintu air pada musim kemarau dapat terlihat pada Tabel 4.3 .

Tabel 4.3 : Hasil Simulasi Pengendalian Pintu Air pada Musim Hujan

Jam ke-	Ketinggian Air (m)	Pengoperasian Pintu Air (%)	Debit (m ³ /detik)	
			Masuk	Keluar
1	5.62	40.00	1177.68	5320.78
2	2.12	0.00	1201.42	0.00
3	9.24	2.29	1222.43	469.11
4	9.47	7.49	1240.55	1566.40
5	9.38	7.77	1255.72	1612.49

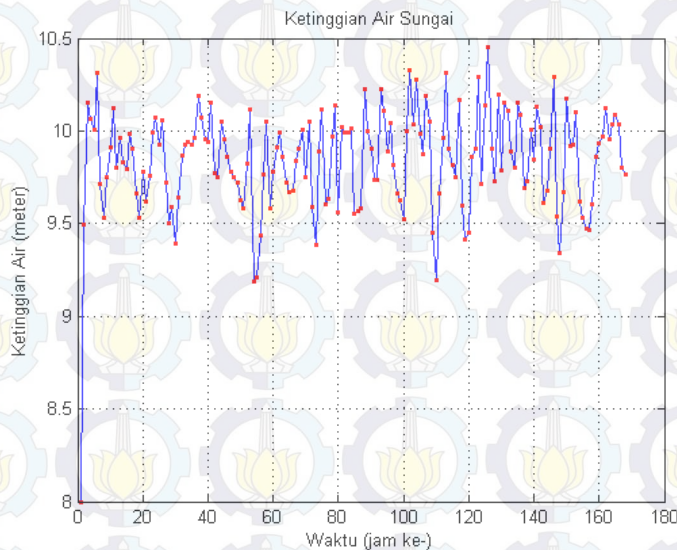
Jam ke-	Ketinggian Air (m)	Pengoperasian Pintu Air (%)	Debit (m^3/detik)	
			Masuk	Keluar
6	9.27	7.88	1270.99	1622.00
7	9.16	8.05	1292.47	1642.60
8	9.05	8.14	1307.99	1645.22
9	8.94	8.26	1323.50	1653.46
10	8.83	8.38	1339.18	1662.38
11	8.72	8.54	1358.02	1677.56
12	8.60	8.69	1377.03	1690.12
13	8.49	8.81	1392.94	1696.23
14	8.38	8.91	1405.75	1699.17
15	8.27	9.04	1418.56	1705.34
16	8.16	9.11	1425.03	1699.05
17	8.05	9.24	1434.74	1705.41
18	7.93	9.33	1441.21	1702.66
19	7.82	9.40	1444.44	1696.38
20	7.71	9.53	1450.91	1699.96
21	7.60	9.65	1457.45	1700.97
22	7.49	9.73	1460.71	1695.21
23	7.38	9.84	1463.98	1692.60
24	7.27	9.96	1467.25	1690.34

Tabel 4.3 merupakan hasil pengoperasian pintu air pada 24 jam awal simulasi. Pada Tabel 4.3 terlihat bahwa debit air yang keluar melewati pintu air bernilai sangat besar pada jam ke-2 karena pintu air terbuka cukup besar pada jam ke-1, yaitu setinggi 2.80 meter atau 40%. Sehingga ketinggian air sungai sebelum pintu air mengalami penurunan yang cukup besar menjadi kurang dari 3 meter. Setelah itu, pintu air akan terbuka 0% (tertutup total) dikarenakan ketinggian air sungai sebelum pintu air bernilai kurang dari 3 meter yg merupakan nilai Z_D pada Tugas Akhir ini. Selanjutnya, pintu air akan

mengendalikan ketinggian air sebelum pintu air hingga berada di kisaran ketinggian 7 meter yang merupakan nilai H_d pada Tugas Akhir ini.

4.3.3 Debit Air Acak

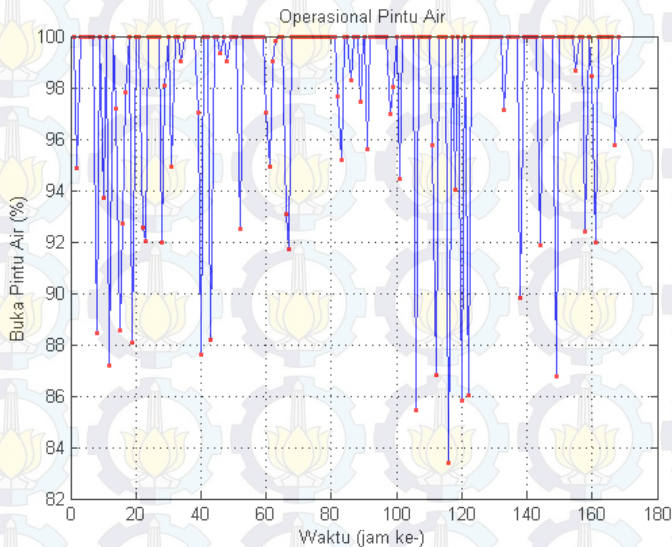
Pada bagian ini, data debit air dibuat secara acak dengan nilai yang cukup besar yang tersaji pada Tabel A.3 (Lampiran A). Debit air acak tersebut merupakan data berdistribusi normal dengan rata-rata 21000 dan simpangan baku sebesar 1000. Nilai awal yang digunakan pada simulasi di bagian ini adalah $H(1) = 8$ meter dan $OP(1) = 100\%$. Grafik ketinggian air sungai sebelum pintu air dengan debit air acak dapat terlihat pada Gambar 4.5 .



Gambar 4.5 : Ketinggian Air Sungai dengan Debit Air Acak

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa ketinggian air sungai sebelum pintu air berada di kisaran 10 meter yang merupakan

ketinggian maksimal dari sungai dan sebagian besar berada di atas ketinggian maksimal tersebut. Hal itu menunjukkan bahwa pada saat debit air acak dengan rata-rata $21000 \text{ m}^3/\text{detik}$ mengalir, sungai mengalami banjir di beberapa jam. Dengan kata lain, metode SMC tidak mampu mengatasi banjir saat debit air yang mengalir bernilai sangat besar, yaitu dalam hal ini bernilai rata-rata $21000 \text{ m}^3/\text{detik}$. Sedangkan grafik pengoperasian pintu air dengan debit air acak terlihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 : Pengoperasian Pintu Air dengan Debit Air Acak

Gambar 4.6 memperlihatkan bahwa pintu air telah terbuka 100% pada sebagian besar interval waktu, tetapi kenyataannya banjir masih terjadi. Hal itu menunjukkan bahwa debit air dengan rata-rata $21000 \text{ m}^3/\text{detik}$ pada

simulasi bagian ini tidak mampu ditampung oleh sungai.

Perbandingan ketinggian sungai sebelum pintu air dan persentase pengoperasian pintu air dengan debit air acak dapat terlihat pada Tabel 4.4 .

Tabel 4.4 : Hasil Simulasi Pengendalian Pintu Air dengan
Debit Air Acak

Jam ke-	Ketinggian Air (m)	Pengoperasian Pintu Air (%)	Debit (m^3/detik)	
			Masuk	Keluar
1	8.00	100.00	21959.44	18375.94
2	9.49	94.87	22087.10	19866.08
3	10.15	100.00	21647.17	21974.94
4	10.07	100.00	21632.55	21844.19
5	10.01	100.00	22903.28	21757.91
6	10.31	100.00	19839.97	22225.97
7	9.72	100.00	20652.69	21298.00
8	9.53	88.44	19304.94	18577.59
9	9.75	100.00	21919.39	21347.25
10	9.91	93.70	21021.53	20237.97
11	10.12	100.00	20700.66	21929.96
12	9.80	87.20	19278.98	18688.26
13	9.97	100.00	21183.43	21688.38
14	9.83	97.18	20740.27	20869.82
15	9.79	88.53	19645.21	18963.55
16	9.98	92.73	19842.56	20138.91
17	9.90	97.80	20238.01	21118.47
18	9.66	100.00	20749.70	21215.37
19	9.53	88.08	19351.24	18498.38
20	9.78	100.00	20818.01	21401.38
21	9.62	100.00	21615.69	21143.31
22	9.76	92.57	20623.33	19771.77
23	9.99	92.01	20301.96	19997.84
24	10.08	100.00	21304.12	21859.35

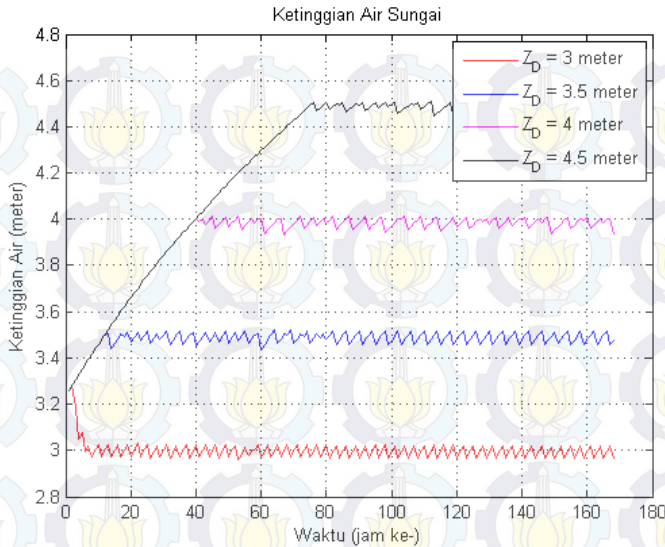
Tabel 4.4 merupakan hasil pengoperasian pintu air pada 24 jam awal simulasi. Pada Tabel 4.4 terlihat bahwa debit air yang masuk dan keluar melewati pintu air bernilai sangat besar dengan rata-rata $21000 \text{ m}^3/\text{detik}$. Hal ini menyebabkan ketinggian air sungai sebelum pintu air berada diambang batas ketinggian sungai dan menyebabkan pintu air terbuka 100% (terbuka total) di beberapa selang waktu.

4.3.4 Perubahan Parameter Tertentu

Simulasi ini dilakukan dengan mengubah nilai parameter pada model sistem pintu air yang telah dikonstantkan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik metode SMC ketika terjadi perubahan dari dalam sistem. Parameter yang akan diubah adalah ketinggian air setelah pintu air (Z_D), ketinggian air sebelum pintu air yang diinginkan (H_d), nilai awal ketinggian air ($H(1)$), dan pengoperasian awal pintu air ($OP(1)$). Pengujian sistem pengendali pada bagian ini dilakukan dengan memperbesar atau memperkecil nilai parameter. Hasil dari perubahan parameter model sistem adalah sebagai berikut :

1. Perubahan ketinggian air setelah pintu air

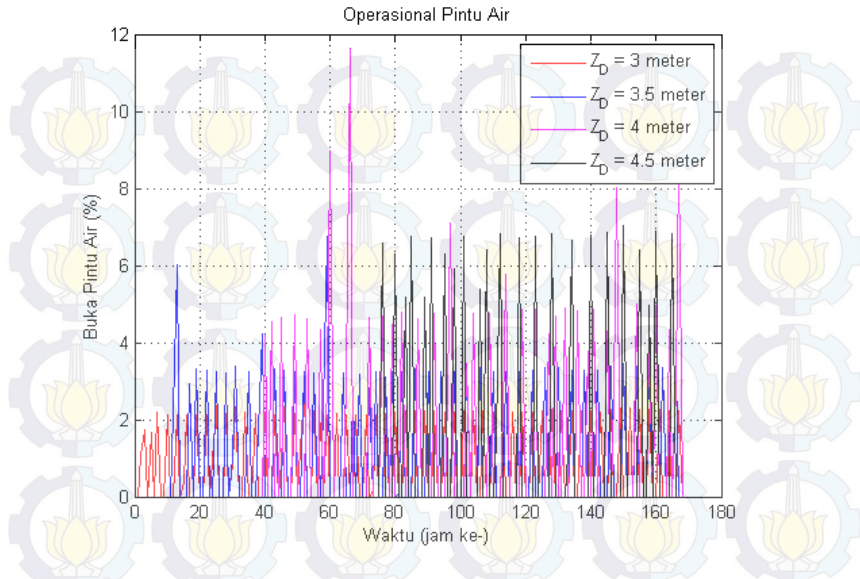
Pada simulasi sebelumnya, ketinggian air sesudah pintu air (Z_D) ditentukan bernilai 3 meter. Sedangkan pada bagian ini, nilai tersebut akan diubah-ubah dan dianalisa hasilnya. Data debit air pada Tabel A.1 (Lampiran A) digunakan sebagai inputan dengan inisialisasi nilai awal sama seperti pada simulasi sebelumnya, yaitu $H(1) = 3.26$ meter dan $OP(1) = 0\%$. Data tersebut tergolong sangat kecil karena mempunyai nilai kurang dari $10 \text{ m}^3/\text{detik}$ di tiap jam. Grafik ketinggian air sebelum pintu air di musim Kemarau saat terjadinya perubahan nilai Z_D dapat dilihat pada Gambar 4.7 .



Gambar 4.7 : Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Z_D

Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa seluruh grafik berada di sekitar nilai Z_D . Hal ini disebabkan debit air yang mengalir sebelum pintu air bernilai sangat kecil, sehingga untuk mencapai nilai H_d sangat berat. Tetapi dari Gambar 4.7 terlihat bahwa metode SMC mampu mengoperasikan pintu air yang dapat mengatur ketinggian air sungai agar tetap dalam kondisi aman dari banjir ketika terjadi perubahan Z_D .

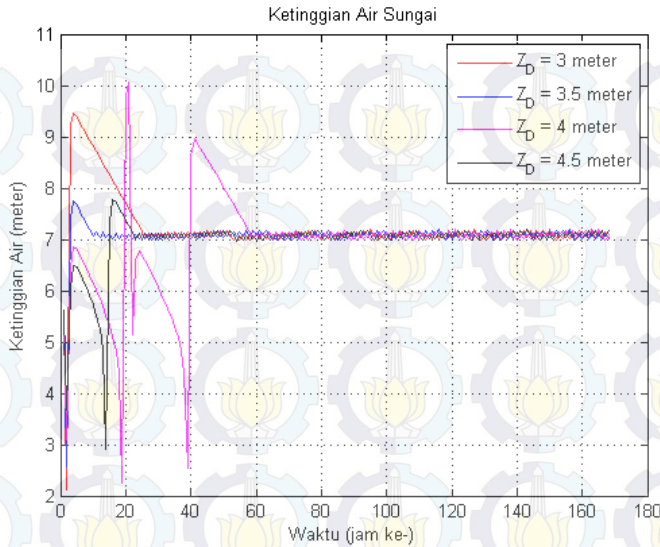
Grafik pengoperasian pintu air di musim Kemarau saat terjadinya perubahan Z_D dapat dilihat pada Gambar 4.8 .



Gambar 4.8 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Z_D

Pada Gambar 4.8 terlihat bahwa pengoperasian pintu air mengikuti perubahan ketinggian air sebelum pintu air tersebut. Tetapi ketika ketinggian air sebelum pintu air kurang dari nilai Z_D , pintu air akan terbuka 0% (tertutup total).

Selanjutnya data debit air pada Tabel A.2 (Lampiran A) yang mempunyai nilai pada kisaran $600 \text{ m}^3/\text{detik}$ - $1500 \text{ m}^3/\text{detik}$ digunakan sebagai inputan simulasi. Nilai awal yang digunakan sama seperti pada simulasi sebelumnya, yaitu $H(1) = 5.62$ meter dan $OP(1) = 40\%$. Grafik ketinggian air yang dihasilkan dapat terlihat pada Gambar 4.9 .

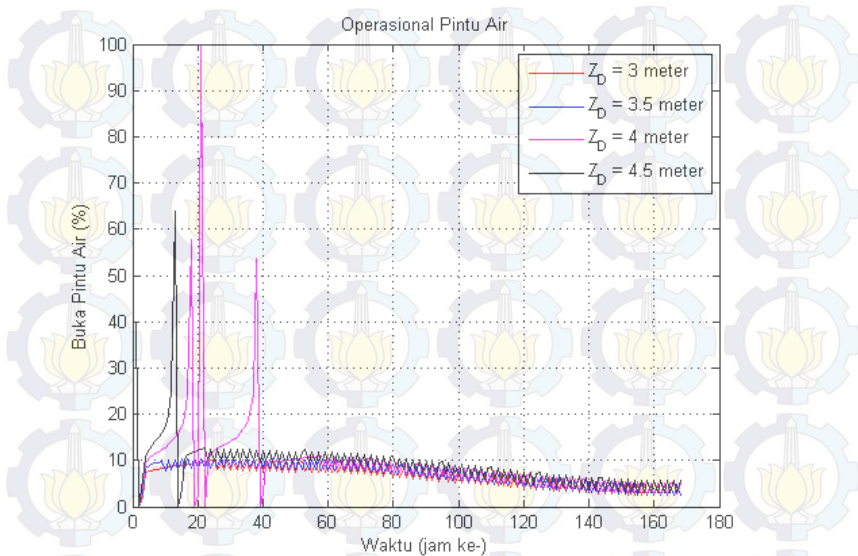


Gambar 4.9 : Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Z_D

Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa saat ketinggian air sebelum pintu air belum mencapai nilai H_d , maka ketinggian air sebelum pintu air pada jam berikutnya menuju ke nilai Z_D . Seperti saat $Z_D = 4$ meter pada jam ke-4 dan ke-24 yang memperlihatkan bahwa ketinggian air sungai sebelum pintu air menuju ke nilai Z_D masing-masing setelah jam-jam tersebut. Begitu pula pada saat $Z_D = 4.5$ meter pada jam ke-4. Tetapi saat ketinggian air sebelum pintu air sudah mencapai nilai H_d , maka ketinggian air sebelum pintu air pada jam-jam berikutnya berada di sekitar nilai H_d .

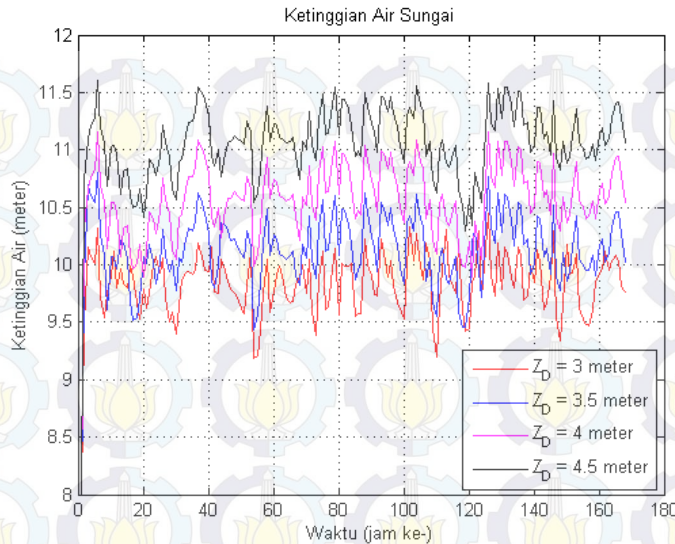
Grafik pengoperasian pintu air di musim Hujan saat terjadinya perubahan Z_D dapat dilihat pada pada

Gambar 4.10 .

Gambar 4.10 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Z_D

Pada Gambar 4.10 tampak bahwa pengoperasian pintu air mengatur ketinggian air sebelum pintu air ke nilai H_d atau Z_D sesuai penjelasan sebelumnya tentang kapan ketinggian air sebelum pintu air menuju nilai H_d atau Z_D .

Selanjutnya debit air pada Tabel A.3 (Lampiran A) digunakan sebagai inputan dengan nilai awal $H(1) = 8$ meter dan $OP(1) = 100\%$. Debit air tersebut bernilai sangat besar dengan rata-rata $21000 \text{ m}^3/\text{detik}$. Grafik ketinggian air yang dihasilkan dengan inputan debit air pada Tabel A.3 dengan perubahan nilai Z_D dapat dilihat pada Gambar 4.11 .

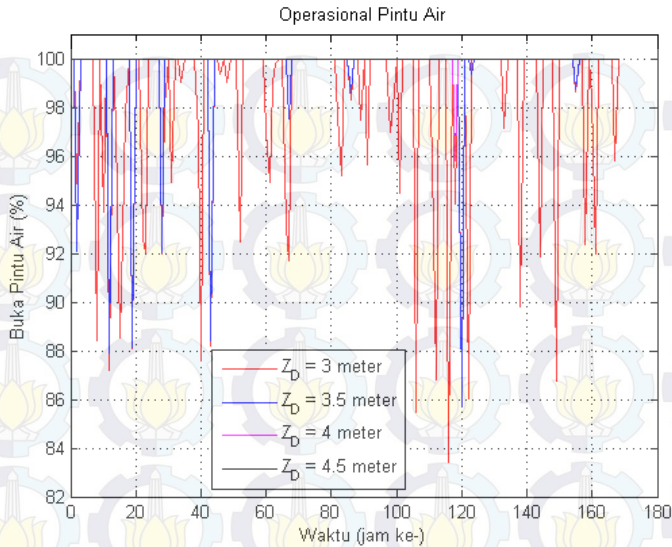


Gambar 4.11 : Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Z_D

Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa semakin tinggi nilai Z_D , maka ketinggian air sebelum pintu air semakin tinggi pula. Hal ini memperlihatkan bahwa metode SMC tidak mampu mengatasi perubahan nilai Z_D ketika debit air yang masuk pintu air bernilai sangat besar.

Grafik pengoperasian pintu air ketika debit air pada Tabel A.3 mengalir sebelum pintu air saat terjadinya perubahan Z_D dapat dilihat pada Gambar 4.12 .

Pada Gambar 4.12 tampak bahwa pembukaan pintu air akan semakin besar saat ketinggian air sebelum pintu air semakin tinggi. Sebaliknya, pembukaan pintu air akan sangat kecil saat ketinggian air sebelum pintu air berubah menjadi semakin rendah. Ketika ketinggian air



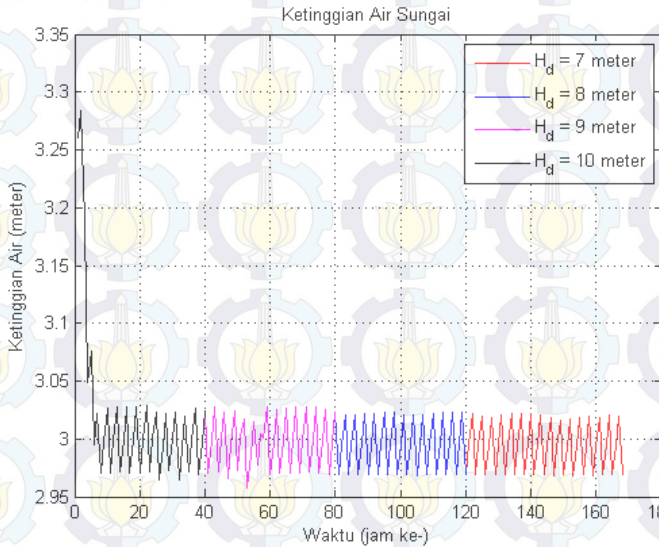
Gambar 4.12 : Pengoperasian Pintu Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Z_D

sebelum pintu air melebihi H_{max} , pintu air akan terbuka 100% (terbuka total).

2. Perubahan nilai ketinggian air sebelum pintu air yang diinginkan

Pada simulasi sebelumnya, Nilai ketinggian air sebelum pintu air yang diinginkan (H_d) ditetapkan bernilai 7 meter. Sedangkan pada simulasi di bagian ini, nilai tersebut akan diubah-ubah agar dapat dilihat karakteristik metode SMC ketika terjadi perubahan H_d . Data debit air pada Tabel A.1 (Lampiran A) akan dijadikan inputan dengan nilai awal yang sama dengan simulasi saat musim Kemarau sebelumnya, yaitu $H(1) = 3.26$ meter dan $OP(1) = 0\%$. Data tersebut bernilai

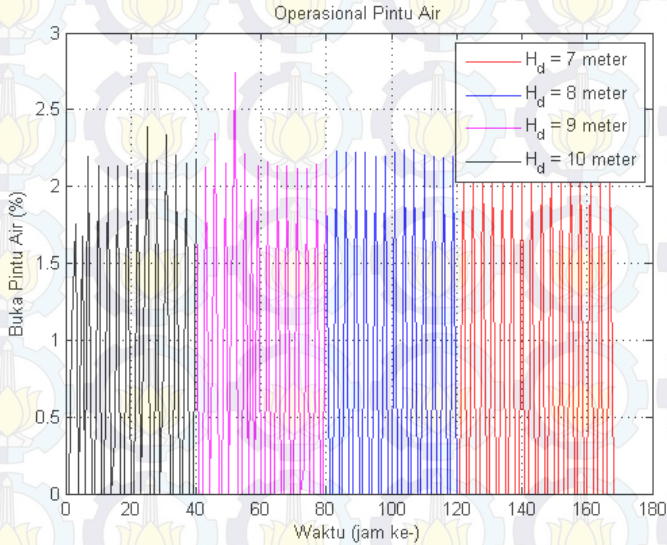
sangat kecil karena mempunyai nilai kurang dari 10 m³/detik pada tiap jamnya. Grafik ketinggian air sebelum pintu air di musim Kemarau saat terjadinya perubahan H_d dapat terlihat pada Gambar 4.13 .



Gambar 4.13 : Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan H_d

Pada Gambar 4.13 terlihat bahwa seluruh grafik ketinggian air sebelum pintu air berimpitan saat terjadi perubahan nilai H_d . Dengan kata lain, ketinggian air sebelum pintu air mempunyai nilai yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan nilai H_d tidak mempengaruhi ketinggian air sebelum pintu air pada saat debit air sungai relatif kecil. Selain itu, grafik ketinggian air tersebut tidak mampu mencapai nilai H_d karena perubahan debit air yang sangat kecil.

Grafik pengoperasian pintu air di musim Kemarau saat terjadinya perubahan H_d dapat dilihat pada Gambar 4.14 .

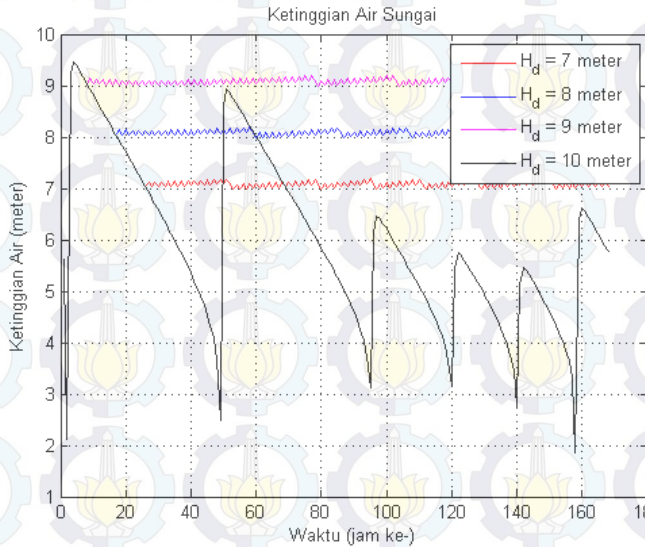


Gambar 4.14 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan H_d

Karena ketinggian air sebelum pintu air mempunyai nilai yang sama saat terjadi perubahan nilai H_d pada musim kemarau, pengoperasian pintu air juga mempunyai nilai yang sama saat terjadi perubahan nilai H_d . Hal ini terbukti dengan grafik pengoperasian pintu air yang berimpitan seperti terlihat pada Gambar 4.14 .

Setelah debit air yang relatif kecil digunakan sebagai inputan, selanjutnya akan digunakan debit air lebih besar yang mempunyai nilai pada kisaran $600 \text{ m}^3/\text{detik}$ - $1500 \text{ m}^3/\text{detik}$ seperti pada Tabel A.2 (Lampiran A)

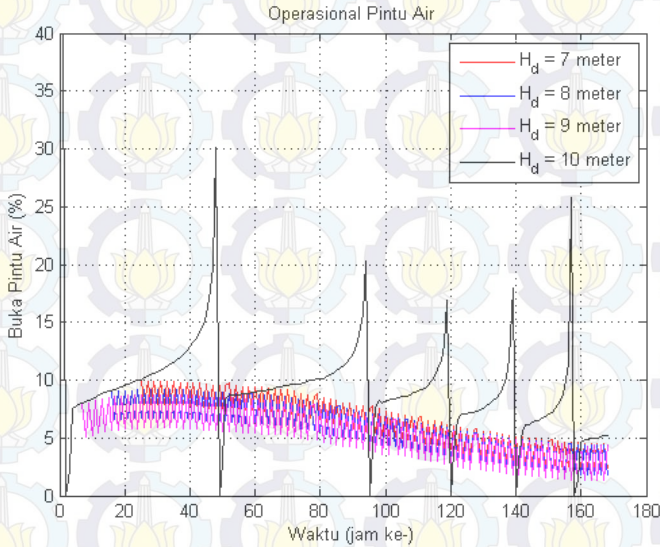
dengan nilai awal $H(1) = 5.62$ meter dan $OP(1) = 40\%$ sebagai inputan. Grafik ketinggian air sebelum pintu air di musim Hujan saat terjadinya perubahan nilai H_d terlihat pada Gambar 4.15 .



Gambar 4.15 : Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan H_d

Pada Gambar 4.15 tampak bahwa ketinggian air sungai sebelum pintu air berada pada kisaran nilai H_d ketika H_d bernilai 7, 8, dan 9 meter. Hal ini dikarenakan ketinggian air sebelum pintu air telah mencapai nilai H_d pada jam ke-4 yang mengakibatkan ketinggian air selanjutnya berada pada kisaran H_d . Sedangkan pada saat H_d bernilai 10, ketinggian air sungai sebelum pintu air menuju ke nilai Z_D karena ketinggian air sebelum pintu air tidak pernah mencapai nilai H_d tersebut.

Grafik pengoperasian pintu air di musim Hujan saat terjadinya perubahan nilai H_d dapat dilihat pada Gambar 4.16 .

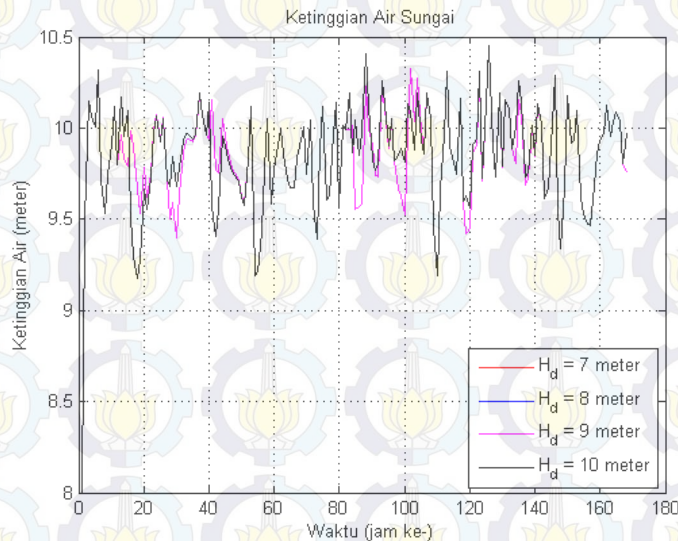


Gambar 4.16 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan H_d

Terlihat pada Gambar 4.16 bahwa ketika H_d bernilai 7, 8, dan 9 meter, pengoperasian pintu air mengendalikan ketinggian air sebelum pintu air pada kisaran nilai H_d . Tetapi saat H_d bernilai 10 meter, pengoperasian pintu air mengendalikan ketinggian air sebelum pintu air menuju nilai Z_D sebesar 3 meter.

Selanjutnya debit air pada Tabel A.3 (Lampiran A) digunakan sebagai inputan dengan nilai awal $H(1) = 8$ meter dan $OP(1) = 100\%$. Debit air tersebut bernilai sangat besar dengan rata-rata $21000 \text{ m}^3/\text{detik}$.

Grafik ketinggian air sebelum pintu air dengan debit air acak saat terjadi perubahan nilai H_d dapat dilihat pada Gambar 4.17 .

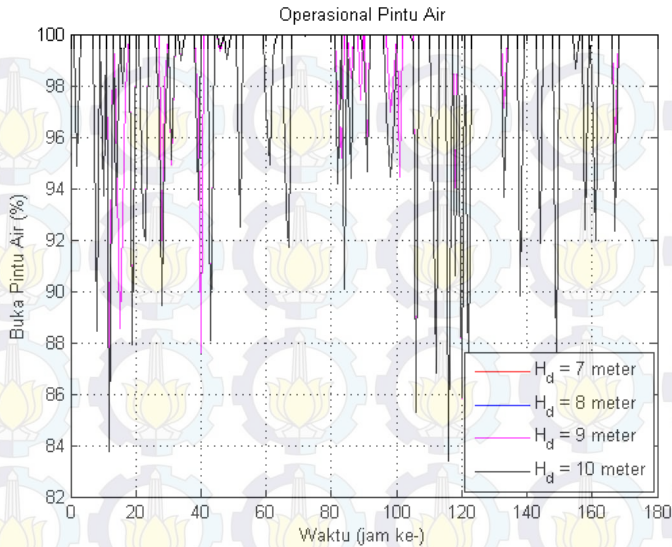


Gambar 4.17 : Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan H_d

Pada Gambar 4.17 memperlihatkan bahwa perubahan H_d tidak banyak mempengaruhi ketinggian air sungai saat debit air sungai bernilai sangat besar, yaitu rata-rata $21000 \text{ m}^3/\text{detik}$. Hal ini berarti metode SMC tidak mampu mengatasi perubahan nilai H_d ketika debit air sungai bernilai sangat besar.

Grafik pengoperasian pintu air dengan debit air acak saat terjadi perubahan nilai H_d dapat dilihat pada Gambar 4.18 .

Seperti halnya ketinggian air sebelum pintu air yang



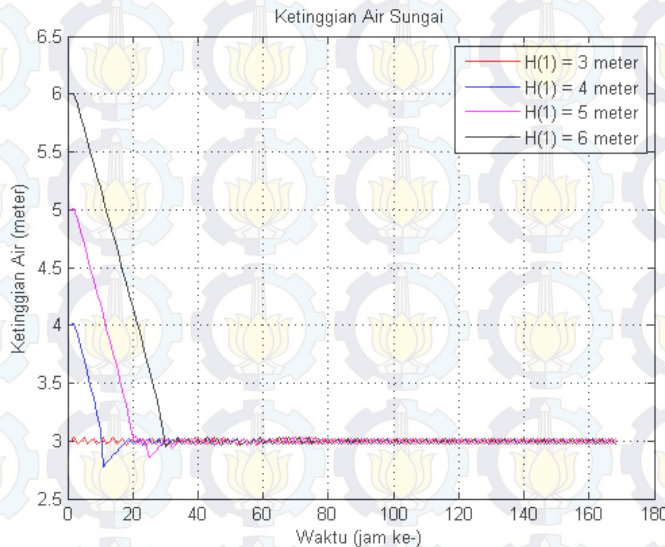
Gambar 4.18 : Pengoperasian Pintu Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan H_d

tidak banyak terpengaruhi saat terjadi perubahan H_d , pengoperasian pintu air juga tidak banyak terpengaruhi saat debit air sungai bernilai sangat besar.

3. Perubahan nilai awal ketinggian air

Pada bagian sebelumnya, nilai awal ketinggian air ($H(1)$) ditetapkan pada nilai tertentu di tiap data debit air sungai. Pada bagian ini nilai tersebut akan diubah-ubah sehingga diketahui karakteristik metode SMC ketika terjadi perubahan nilai awal ketinggian air. Data debit air pada Tabel A.1 (Lampiran A) yang mempunyai nilai kurang dari $10 \text{ m}^3/\text{detik}$ akan digunakan sebagai inputan dengan nilai awal $OP(1) = 0\%$ dan $H(1)$ yang akan berubah-ubah. Grafik ketinggian air sebelum pintu

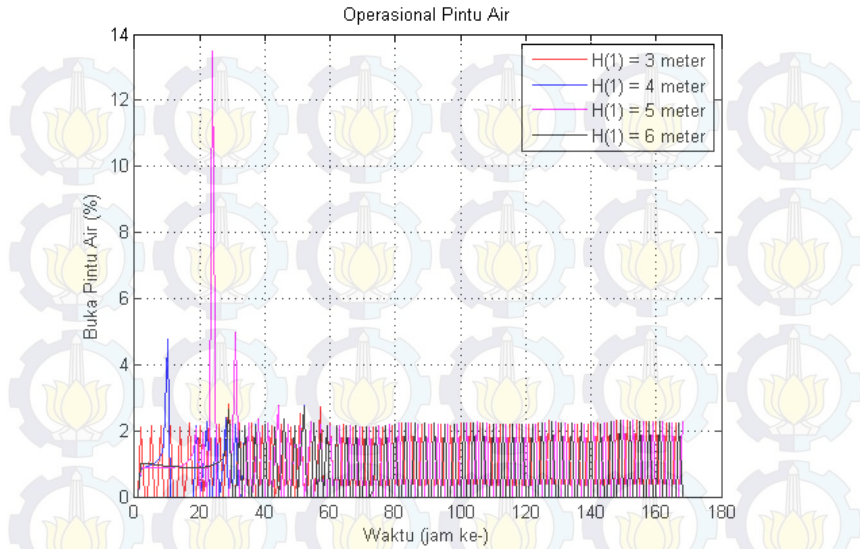
air yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.19 .



Gambar 4.19 : Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air

Pada Gambar 4.19 tampak bahwa grafik ketinggian air sebelum pintu air berada di kisaran nilai Z_D yang telah ditentukan bernilai 3 meter saat terjadi perubahan nilai awal ketinggian air. Selain itu, debit air sungai yang kecil membuat ketinggian air sungai tidak mampu stabil ke nilai H_d sebesar 7 meter.

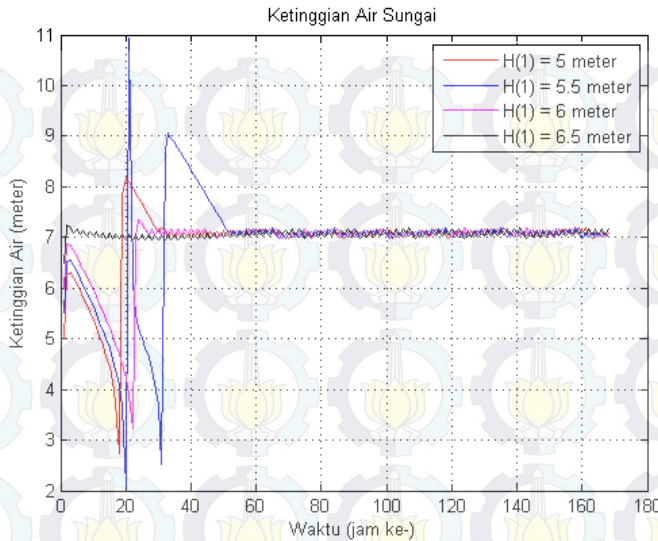
Grafik pengoperasian pintu air di musim Kemarau saat terjadi perubahan $H(1)$ dapat dilihat pada Gambar 4.20 .



Gambar 4.20 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air

Pada Gambar 4.20 terlihat bahwa pengoperasian pintu air mengikuti perubahan ketinggian air sebelum pintu air tersebut. Pengoperasian pintu air secara keseluruhan hampir mempunyai nilai yang sama karena ketinggian air sama-sama stabil ke nilai Z_D saat terjadi perubahan $H(1)$.

Untuk debit air pada Tabel A.2 (Lampiran A) dengan nilai pada kisaran $600 \text{ m}^3/\text{detik}$ - $1500 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan $OP(1) = 40\%$, grafik ketinggian air sebelum pintu air yang akan dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.21 .

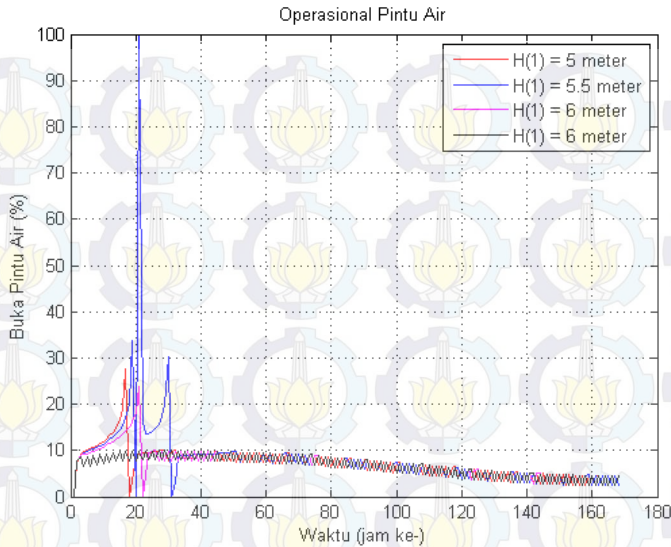


Gambar 4.21 : Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air

Gambar 4.21 memperlihatkan bahwa pada akhirnya grafik ketinggian air sebelum pintu air akan stabil di nilai H_d sebesar 7 meter ketika ketinggian air sudah mencapai H_d . Sedangkan ketika ketinggian air sebelum pintu air belum mencapai H_d , ketinggian air tersebut akan menuju ke nilai Z_D . Hal ini terlihat pada awal-awal simulasi yang terlihat pada Gambar 4.21 .

Grafik pengoperasian pintu air di musim Hujan saat terjadinya perubahan $H(1)$ dapat dilihat pada Gambar 4.22 .

Dari Gambar 4.22 tampak bahwa pengoperasian pintu hampir mempunyai nilai yang sama saat ketinggian air sebelum pintu air stabil di nilai H_d

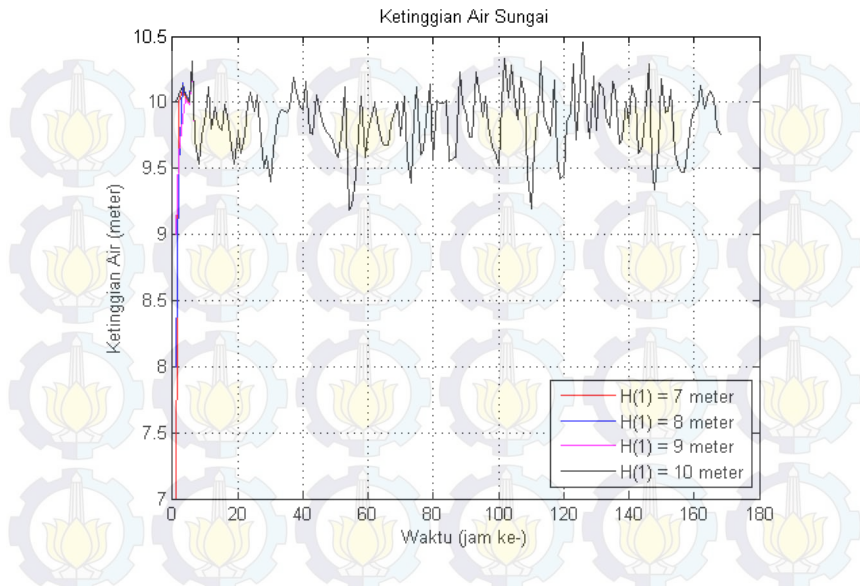


Gambar 4.22 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air

sebesar 7 meter. Tetapi pada awal simulasi, pintu air terbuka sedemikian hingga ketinggian air sebelum pintu air menuju ke nilai Z_D sebesar 3 meter.

Sedangkan untuk data debit air yang tersaji pada Tabel A.3 (Lampiran A) dengan rata-rata 21000 m^3/detik , grafik ketinggian air sebelum pintu air yang dihasilkan dengan $OP(1) = 75\%$ dapat dilihat pada Gambar 4.15 .

Perubahan nilai awal ketinggian air ($H(1)$) pada debit air acak hanya mempengaruhi ketinggian air sungai beberapa waktu awal. Setelah itu, perubahan nilai awal tersebut tidak berpengaruh banyak pada ketinggian air sungai. Hal ini tampak pada Gambar

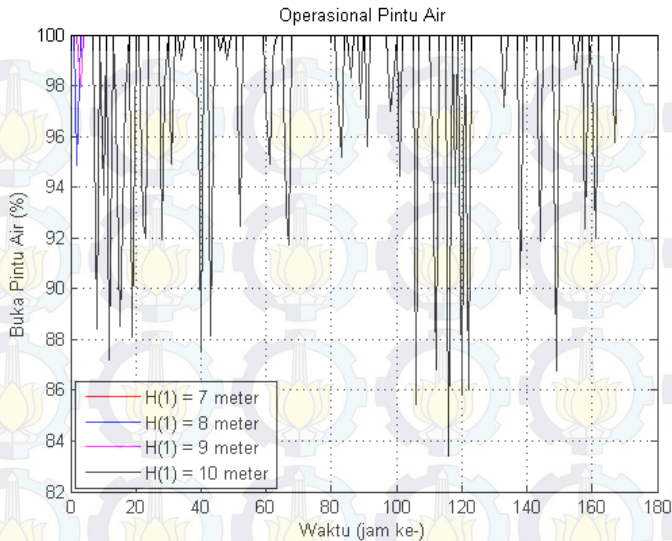


Gambar 4.23 : Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air

4.23 yang memperlihatkan bahwa sebelum jam ke-10, grafik ketinggian air mempunyai perbedaan saat terjadi Perubahan $H(1)$. Sedangkan setelah jam ke-10, grafik tersebut mulai berimpitan yang menandakan bahwa ketinggian air sungai bernilai sama saat terjadi perubahan $H(1)$. Hal ini berarti metode SMC tidak mampu mengatasi perubahan nilai $H(1)$ ketika debit air sungai bernilai sangat besar.

Grafik pengoperasian pintu air ketika debit air pada Tabel A.3 mengalir menuju pintu air saat terjadinya perubahan $H(1)$ dapat dilihat pada Gambar 4.24 .

Gambar 4.24 memperlihatkan bahwa pengoperasian pintu air mengikuti perubahan ketinggian air sebelum

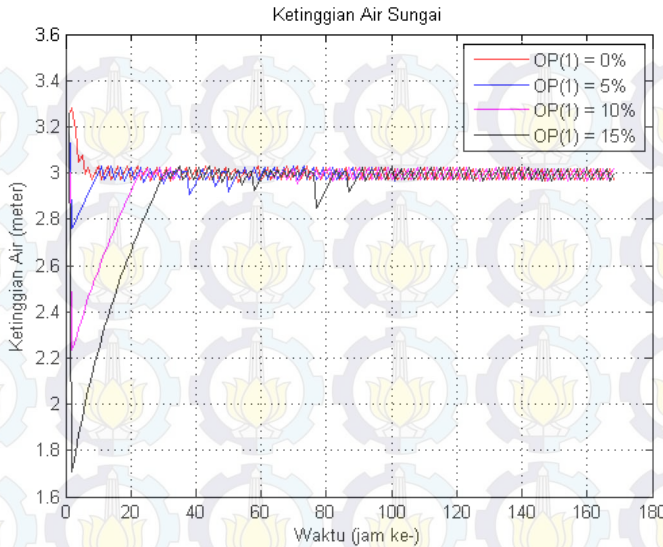


Gambar 4.24 : Pengoperasian Pintu Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Nilai Awal Ketinggian Air

pintu air yang terlihat pada Gambar 4.23

4. Perubahan pengoperasian awal pintu air

Pada simulasi sebelumnya, Pengoperasian Awal Pintu Air (OP(1)) ditetapkan hanya satu nilai. Sedangkan pada bagian ini nilai tersebut akan diubah-ubah dan dianalisa perubahan-perubahan yang terjadi pada grafik ketinggian air sebelum pintu air. Pertama, data debit air pada Tabel A.1 (Lampiran A) digunakan sebagai inputan. Data tersebut bernilai sangat kecil karena mempunyai nilai kurang dari $10 \text{ m}^3/\text{detik}$ pada tiap jamnya. Grafik ketinggian air sebelum pintu air yang dihasilkan saat nilai awal $H(1) = 3.26$ meter tersaji pada Gambar 4.25 .

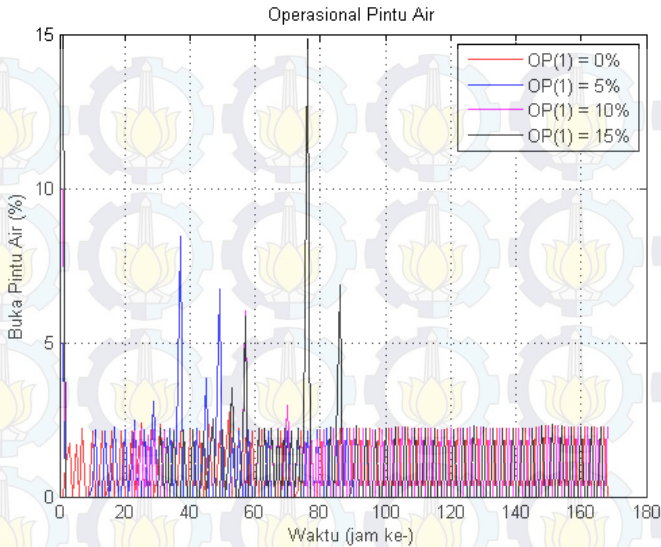


Gambar 4.25 : Ketinggian Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air

Terlihat pada Gambar 4.25 bahwa perubahan nilai $OP(1)$ mempengaruhi ketinggian air sebelum pintu air pada jam ke-2, semakin besar $OP(1)$ maka semakin rendah ketinggian airnya. Sedangkan ketinggian air selanjutnya (jam ke-3 dan seterusnya) juga terpengaruh tetapi tetap menuju nilai Z_D sebesar 3 meter.

Grafik pengoperasian pintu air untuk mengendalikan ketinggian air sebelum pintu air seperti Gambar 4.25 dapat dilihat pada Gambar 4.26 .

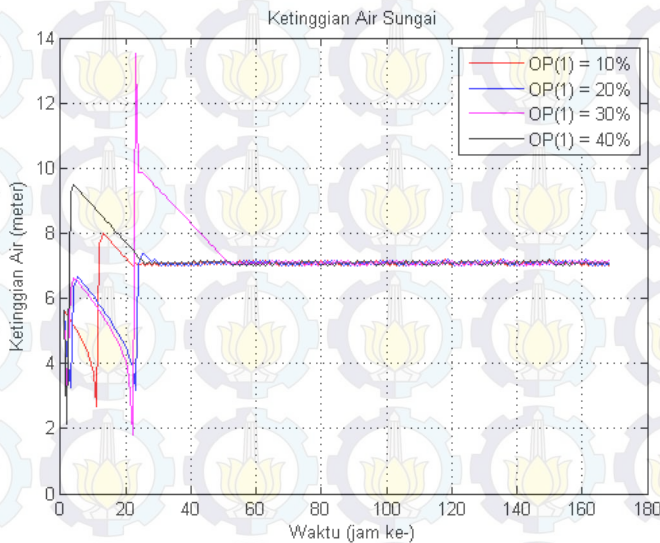
Gambar 4.26 memperlihatkan bahwa pengoperasian pintu air mengarahkan ketinggian air sebelum pintu air menuju nilai Z_D dan ketika ketinggian air sebelum pintu air dibawah Z_D maka pintu air tertutup total.



Gambar 4.26 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Kemarau dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air

Kedua, data debit air pada Tabel A.2 (Lampiran A) menjadi inputan selanjutnya. Data tersebut mempunyai nilai antara $600 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan $1500 \text{ m}^3/\text{detik}$. Grafik yang dihasilkan dengan inisialisasi nilai awal $H(1) = 5.62$ meter disajikan pada Gambar 4.27 .

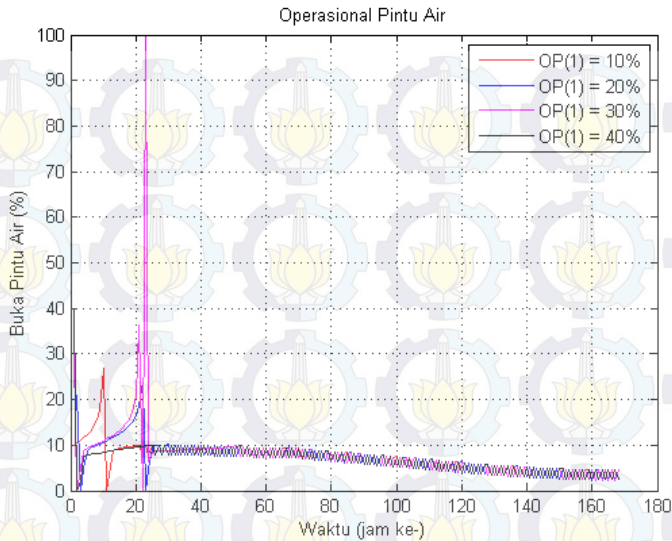
Seperti halnya grafik pada Gambar 4.25 , Gambar 4.27 juga memperlihatkan bahwa ketinggian air pada jam ke-2 semakin rendah ketika nilai $OP(1)$ semakin besar. Sedangkan ketinggian air selanjutnya (jam ke-3 dan seterusnya) berada di kisaran nilai H_d sebesar 7 meter saat ketinggian air telah mencapai nilai tersebut dan ketika ketinggian air belum mencapai H_d maka ketinggian air akan menuju ke nilai Z_D sebesar 3 meter.



Gambar 4.27 : Ketinggian Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air

Grafik pengoperasian pintu air untuk mengendalikan ketinggian air sebelum pintu air seperti Gambar 4.27 dapat dilihat pada Gambar 4.28 .

Dari Gambar 4.28 tampak bahwa pengoperasian pintu hampir mempunyai nilai yang sama saat ketinggian air sebelum pintu air stabil di nilai H_d sebesar 7 meter. Tetapi pada awal simulasi, pintu air terbuka sedemikian hingga ketinggian air sebelum pintu air menuju ke nilai Z_D sebesar 3 meter.

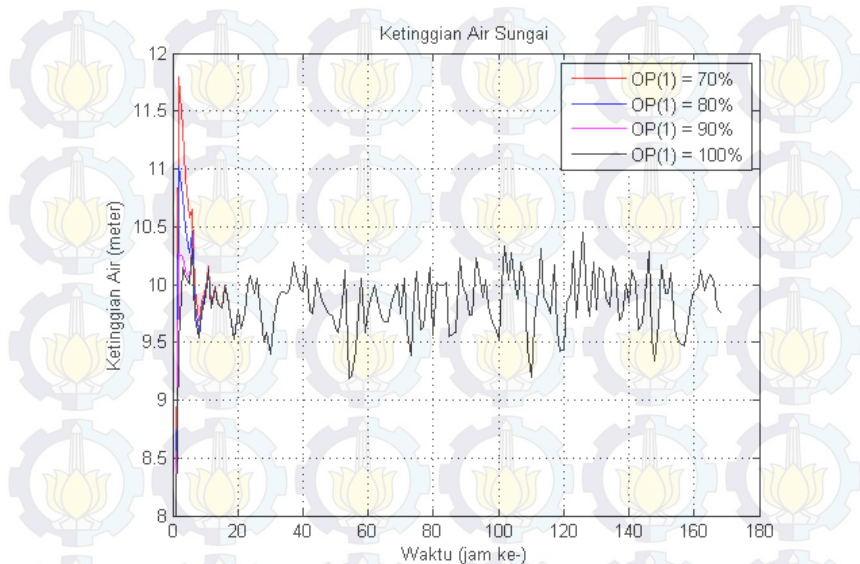


Gambar 4.28 : Pengoperasian Pintu Air pada Musim Hujan dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air

Ketiga, data debit air pada Tabel A.3 digunakan sebagai inputan dengan $H(1) = 8$ meter. Debit air tersebut bernilai sangat besar dengan rata-rata 21000 m^3/detik . Grafik ketinggian air sebelum pintu air dapat dilihat pada Gambar 4.29 .

Sama seperti simulasi saat terjadi perubahan OP(1) sebelumnya, pada Gambar 4.29 terlihat bahwa ketinggian air dengan debit air acak sebagai inputan juga semakin rendah ketika nilai OP(1) semakin besar saat jam ke-2. Selanjutnya perubahan OP(1) tidak berpengaruh banyak pada ketinggian air sebelum pintu air. Hal ini memperlihatkan bahwa metode SMC tidak mampu mengatasi perubahan nilai OP(1) ketika debit

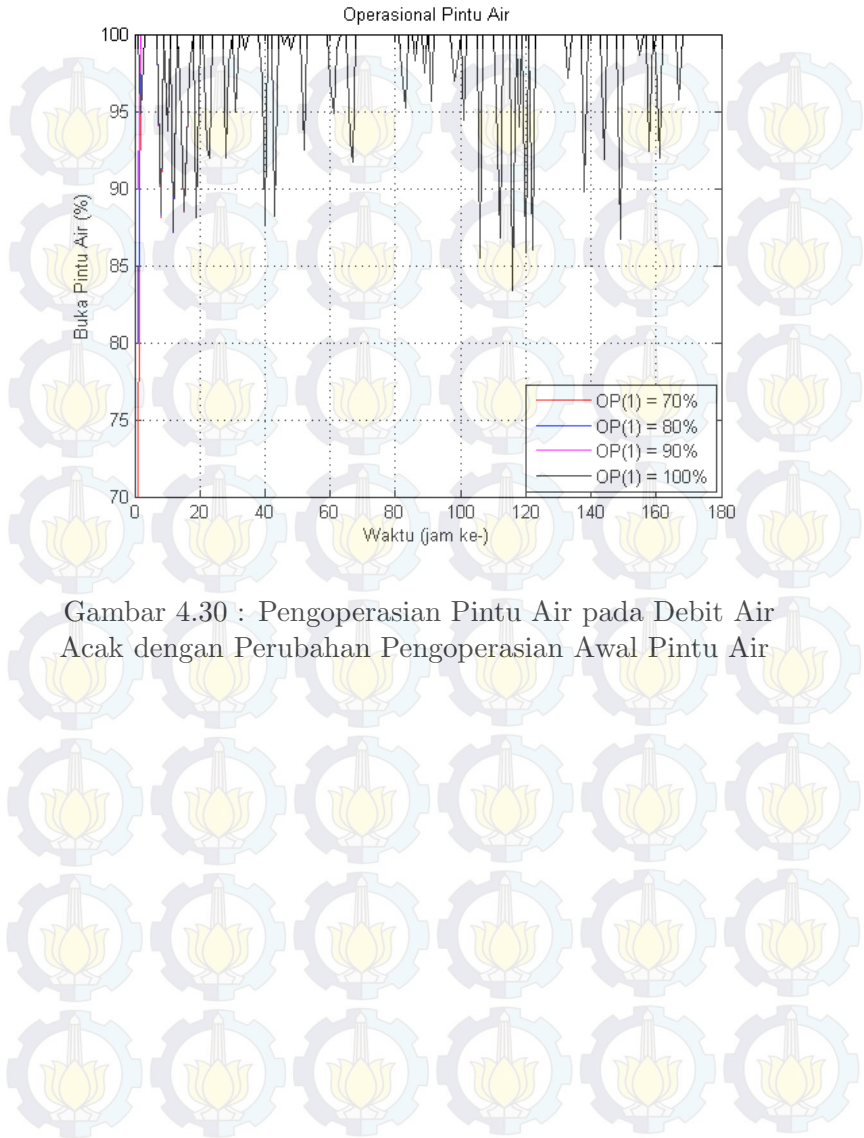
air sungai bernilai sangat besar.



Gambar 4.29 : Ketinggian Air pada Debit Air Acak dengan Perubahan Pengoperasian Awal Pintu Air

Grafik pengoperasian pintu air untuk mengendalikan ketinggian air sebelum pintu air seperti Gambar 4.29 dapat dilihat pada Gambar 4.30 .

Tampak pada Gambar 4.30 bahwa pengoperasian pintu air hanya terpengaruh di awal waktu seperti halnya ketinggian air sebelum pintu air saat terjadi perubahan OP(1). Selanjutnya perubahan OP(1) tidak berpengaruh pada pengoperasian pintu air.



BAB V PENUTUP

Pada bab ini dijabarkan beberapa kesimpulan yang diperoleh dari analisis dan pembahasan Tugas Akhir ini. Selain itu, terdapat juga saran yang dapat digunakan sebagai referensi pada penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah disajikan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Tugas Akhir ini telah berhasil merancang desain pengendali pintu air dengan metode *Sliding Mode Control* (SMC) yang merupakan *control input OP*.
2. Penerapan metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada pengendalian pintu air memperlihatkan bahwa :
 - a. Saat debit air normal akan menyebabkan ketinggian air sungai berubah secara normal juga. Metode SMC mampu mengendalikan pintu air mengikuti perubahan ketinggian air sungai. Ketika ketinggian air sungai tinggi maka pembukaan pintu air akan besar dan sebaliknya.
 - b. Saat debit air sangat besar dengan rata-rata 21000 m³/detik dapat menyebabkan ketinggian air sungai menjadi sangat tinggi. Hal ini menyebabkan terjadinya banjir dan metode SMC tidak mampu mengatasi banjir tersebut. Meskipun pintu air terbuka 100% (terbuka total).

c. Ketika terjadi perubahan nilai parameter (Z_D , H_d , $H(1)$, $OP(1)$) di dalam sistem, maka didapatkan beberapa hasil yang diantaranya adalah :

- Saat ketinggian air sungai belum mencapai H_d , maka ketinggian air selanjutnya akan menuju ke nilai Z_D dan pintu air bergerak sedemikian hingga ketinggian air menuju ke nilai Z_D .
- Saat ketinggian air sungai sudah mencapai H_d , maka ketinggian air selanjutnya akan berada di sekitar nilai H_d dan pintu air akan bergerak sedemikian hingga ketinggian air stabil di nilai H_d
- Untuk debit air sungai yang bernilai sangat besar, metode SMC tidak mampu mengatasi perubahan parameter yang terjadi.

5.2 Saran

Pada Tugas Akhir ini, ketinggian air setelah pintu air bernilai konstan. Pada penelitian selanjutnya, ketinggian tersebut dapat dibuat menjadi tidak konstan. Sehingga ketinggian air sebelum pintu air dapat berubah secara fluktuatif karena ketinggian tersebut dipengaruhi oleh perubahan ketinggian air setelah pintu air.

Selain itu, Pada penelitian selanjutnya dapat digunakan metode lain untuk mendapatkan desain kendali yang lebih baik. Metode terbaru yang dapat digunakan adalah metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC), *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC), maupun metode yang lain.

BAB V PENUTUP

Pada bab ini dijabarkan beberapa kesimpulan yang diperoleh dari analisis dan pembahasan Tugas Akhir ini. Selain itu, terdapat juga saran yang dapat digunakan sebagai referensi pada penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah disajikan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Tugas Akhir ini telah berhasil merancang desain pengendali pintu air dengan metode *Sliding Mode Control* (SMC) yang merupakan *control input OP*.
2. Penerapan metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada pengendalian pintu air memperlihatkan bahwa :
 - a. Saat debit air normal akan menyebabkan ketinggian air sungai berubah secara normal juga. Metode SMC mampu mengendalikan pintu air mengikuti perubahan ketinggian air sungai. Ketika ketinggian air sungai tinggi maka pembukaan pintu air akan besar dan sebaliknya.
 - b. Saat debit air sangat besar dengan rata-rata 21000 m³/detik dapat menyebabkan ketinggian air sungai menjadi sangat tinggi. Hal ini menyebabkan terjadinya banjir dan metode SMC tidak mampu mengatasi banjir tersebut. Meskipun pintu air terbuka 100% (terbuka total).

c. Ketika terjadi perubahan nilai parameter (Z_D , H_d , $H(1)$, $OP(1)$) di dalam sistem, maka didapatkan beberapa hasil yang diantaranya adalah :

- Saat ketinggian air sungai belum mencapai H_d , maka ketinggian air selanjutnya akan menuju ke nilai Z_D dan pintu air bergerak sedemikian hingga ketinggian air menuju ke nilai Z_D .
- Saat ketinggian air sungai sudah mencapai H_d , maka ketinggian air selanjutnya akan berada di sekitar nilai H_d dan pintu air akan bergerak sedemikian hingga ketinggian air stabil di nilai H_d
- Untuk debit air sungai yang bernilai sangat besar, metode SMC tidak mampu mengatasi perubahan parameter yang terjadi.

5.2 Saran

Pada Tugas Akhir ini, ketinggian air setelah pintu air bernilai konstan. Pada penelitian selanjutnya, ketinggian tersebut dapat dibuat menjadi tidak konstan. Sehingga ketinggian air sebelum pintu air dapat berubah secara fluktuatif karena ketinggian tersebut dipengaruhi oleh perubahan ketinggian air setelah pintu air.

Selain itu, Pada penelitian selanjutnya dapat digunakan metode lain untuk mendapatkan desain kendali yang lebih baik. Metode terbaru yang dapat digunakan adalah metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC), *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC), maupun metode yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim (2012), *Profil Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Bengawan Solo*, Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, Surakarta.

Choudhury, D. (2005), *Modern Control Engineering*, PHI Learning.

Herlambang, T. (2010), *Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem Steam Drum Boiler dengan Metode Sliding Mode Control (SMC)*, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.

Lusiana, D. I. (2011), *Studi Peningkatan Kapasitas Saluran Pelangwot Untuk Pengendalian Banjir Sungai Bengawan Solo*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil, FTSP ITS, Surabaya.

Mudjib, C. M. dan Lasminto, U. (2013), 'Studi Angkutan Sedimen Sudetan Pelangwot-Sedayu Lawas Sungai Bengawan Solo', **Jurnal Teknik POMITS 2**, 253–258.

Mulyanto, H. (2007), *Sungai, Fungsi dan Sifat-sifatnya*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Naidu, D. (2002), *Optimal Control Systems*, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA.

Ogata, K. (2010), *Modern Control Engineering (fifth edition)*, Instrumentation and controls series, Prentice Hall.

- Paraskevopoulos, P. (2001), *Modern Control Engineering, Automation and Control Engineering*, Taylor & Francis.
- Purnaningrum, E. (2014), *Pengendalian Pintu air Bendung Gerak Dengan Metode Ensemble Kalman Filter Berbasis Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)*, Thesis Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- Riyanto, B. (2013), *Perencanaan Peningkatan Kapasitas Floodway Pelangwot-Sedayu Lawas Sungai Bengawan Solo*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil, FTSP ITS, Surabaya.
- Rizan, R. I. (2008), *Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali pada Inverted Pendulum Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control*, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- Zhou, W., Thoresen, H. dan Glemmstad, B. (2012), 'Application of Kalman filter based nonlinear MPC for flood gate control of hydropower plant', **Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE**, 1–4.

LAMPIRAN A

Data Debit Air

Tabel A.1: Debit Air pada Musim Kemarau

Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)
1	9.46	25	9.59	49	9.70	73	9.41	97	8.79	121	8.74	145	8.22
2	9.38	26	9.51	50	9.63	74	9.27	98	8.79	122	8.74	146	8.13
3	9.30	27	9.50	51	9.56	75	9.26	99	8.64	123	8.58	147	8.04
4	9.30	28	9.42	52	9.48	76	9.12	100	8.64	124	8.51	148	8.03
5	9.29	29	9.34	53	9.42	77	8.97	101	8.55	125	8.34	149	8.01
6	9.21	30	9.33	54	9.27	78	8.96	102	8.55	126	8.25	150	8.01
7	9.27	31	9.19	55	9.14	79	8.81	103	8.53	127	8.40	151	8.15
8	9.34	32	9.18	56	9.07	80	8.66	104	8.52	128	8.48	152	8.12
9	9.41	33	9.18	57	9.12	81	8.65	105	8.58	129	8.61	153	8.25
10	9.45	34	9.10	58	9.18	82	8.65	106	8.71	130	8.66	154	8.39
11	9.50	35	9.10	59	9.18	83	8.71	107	8.83	131	8.72	155	8.39
12	9.55	36	9.08	60	9.23	84	8.71	108	8.83	132	8.78	156	8.37
13	9.61	37	9.06	61	9.29	85	8.76	109	8.82	133	8.75	157	8.36
14	9.59	38	9.10	62	9.33	86	8.81	110	8.82	134	8.79	158	8.34
15	9.59	39	9.23	63	9.34	87	8.79	111	8.88	135	8.76	159	8.40
16	9.52	40	9.35	64	9.39	88	8.76	112	8.93	136	8.74	160	8.45
17	9.52	41	9.48	65	9.39	89	8.82	113	8.92	137	8.81	161	8.51
18	9.52	42	9.60	66	9.45	90	8.81	114	8.90	138	8.81	162	8.56
19	9.60	43	9.67	67	9.45	91	8.81	115	8.95	139	8.72	163	8.55
20	9.60	44	9.73	68	9.50	92	8.96	116	8.93	140	8.71	164	8.53
21	9.67	45	9.79	69	9.50	93	8.96	117	8.92	141	8.69	165	8.43
22	9.67	46	9.78	70	9.55	94	8.96	118	8.90	142	8.69	166	8.43
23	9.67	47	9.72	71	9.55	95	9.02	119	8.89	143	8.55	167	8.27
24	9.67	48	9.72	72	9.55	96	9.02	120	8.89	144	8.39	168	8.12

Sumber : Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta 1

Tabel A.2: Debit Air pada Musim Hujan

Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)
1	1177.68	25	1467.25	49	1434.74	73	1332.91	97	1084.73	121	842.13	145	654.68
2	1201.42	26	1470.52	50	1431.50	74	1320.40	98	1084.73	122	832.04	146	650.13
3	1222.43	27	1473.79	51	1428.27	75	1311.09	99	1056.40	123	819.42	147	643.41
4	1240.55	28	1477.05	52	1425.03	76	1301.78	100	1050.80	124	809.44	148	638.93
5	1255.72	29	1477.05	53	1421.80	77	1295.57	101	1045.21	125	799.48	149	634.44
6	1270.99	30	1477.05	54	1418.56	78	1286.33	102	1036.81	126	789.57	150	627.72
7	1292.47	31	1477.05	55	1412.16	79	1277.13	103	1028.42	127	779.76	151	621.1
8	1307.99	32	1477.05	56	1405.75	80	1264.86	104	1020.13	128	769.94	152	614.48
9	1323.50	33	1473.79	57	1402.55	81	1246.62	105	1011.83	129	760.24	153	610.07
10	1339.18	34	1473.79	58	1399.35	82	1234.48	106	1000.77	130	752.98	154	605.66
11	1358.02	35	1473.79	59	1396.15	83	1225.44	107	987.12	131	748.15	155	599.15
12	1377.03	36	1473.79	60	1392.94	84	1216.43	108	978.93	132	745.73	156	594.82
13	1392.94	37	1470.52	61	1392.94	85	1204.42	109	970.77	133	738.55	157	588.31
14	1405.75	38	1470.52	62	1389.74	86	1195.48	110	957.29	134	729.02	158	583.97
15	1418.56	39	1467.25	63	1386.54	87	1183.61	111	946.51	135	719.49	159	583.97
16	1425.03	40	1467.25	64	1383.37	88	1174.71	112	933.21	136	710.10	160	579.7
17	1434.74	41	1467.25	65	1380.20	89	1165.87	113	922.56	137	703.05	161	577.57
18	1441.21	42	1460.71	66	1373.86	90	1154.14	114	914.65	138	696.01	162	575.44
19	1444.44	43	1457.45	67	1373.86	91	1145.33	115	909.39	139	686.76	163	575.44
20	1450.91	44	1450.91	68	1370.70	92	1136.60	116	901.51	140	679.83	164	575.44
21	1457.45	45	1444.44	69	1370.70	93	1127.90	117	891.04	141	672.89	165	575.44
22	1460.71	46	1437.97	70	1364.36	94	1113.39	118	880.67	142	668.34	166	575.44
23	1463.98	47	1434.74	71	1354.85	95	1104.79	119	867.71	143	663.79	167	575.44
24	1467.25	48	1434.74	72	1345.45	96	1096.19	120	854.92	144	654.23	168	575.44

Sumber : Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta 1

Tabel A.3: Debit Air Acak

Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)	Jam ke-	Debit (m ³ /s)
1	21959.44	25	22101.08	49	20977.95	73	22421.28	97	20902.25	121	21701.88	145	23019.31
2	22087.1	26	20553.39	50	20991.24	74	22407.61	98	20443.38	122	19994.53	146	19206.3
3	21647.17	27	20533.29	51	21929.46	75	19971	99	20384.5	123	19893.57	147	20340.49
4	21632.55	28	19564.18	52	20909.57	76	21206.51	100	22604.55	124	22790.56	148	21771.45
5	22903.28	29	20022.28	53	18358.85	77	22341.11	101	21768.5	125	23162.38	149	20179.66
6	19839.97	30	21605.89	54	20513.85	78	22332.72	102	21086.93	126	20180.72	150	21017.89
7	20652.69	31	20886.35	55	21195.97	79	19715.11	103	22704.36	127	20962.95	151	21654.54
8	19304.94	32	21764.56	56	21959.72	80	22618.38	104	21023.63	128	22963	152	22257.7
9	21919.39	33	21669.9	57	22380.32	81	21661.64	105	21290.04	129	20459.73	153	20072.92
10	21021.53	34	21375.78	58	20058.54	82	21227.35	106	19580.1	130	22717.5	154	20830.12
11	20700.66	35	21766.65	59	21760.87	83	20774.42	107	21475.27	131	21819.81	155	20528.33
12	19278.98	36	22523.47	60	21237.92	84	20034.01	108	19552.68	132	21055.52	156	20885.77
13	21183.43	37	21576.82	61	20791.63	85	21095.02	109	20011.72	133	20646.87	157	21369.49
14	20740.27	38	21425.97	62	21024.74	86	20743.27	110	21949.38	134	22693.15	158	20381.38
15	19645.21	39	20957.07	63	20971.91	87	23310.13	111	21351.22	135	21711.05	159	21800.12
16	19842.56	40	19757.74	64	21140.36	88	21190.06	112	20127.72	136	20367.24	160	21426.7
17	20238.01	41	20495.05	65	21237.59	89	20826.6	113	20601.87	137	21392.73	161	20527.67
18	20749.7	42	21325.85	66	20328.45	90	20985.97	114	21256.44	138	20122.04	162	21275.95
19	19351.24	43	19888.58	67	19955	91	20387.26	115	21220.03	139	21148.95	163	21984.23
20	20818.01	44	21468.18	68	21965.77	92	23071.8	116	19288.56	140	22531.88	164	21993.11
21	21615.69	45	21322.61	69	20780.24	93	21637.02	117	19794.24	141	21531.85	165	21668.21
22	20623.33	46	21100.02	70	22414.54	94	21074.89	118	19227.09	142	20240.33	166	20935
23	20301.96	47	21301.43	71	20075.81	95	22123.27	119	20927.51	143	21347.98	167	20379.9
24	21304.12	48	21023.82	72	20405.86	96	20966.87	120	19278.89	144	20302.2	168	21224.1

Keterangan : Debit air pada Tabel A.3 merupakan data berdistribusi normal dengan rata-rata 21000 dan simpangan baku 1000 yang dibangkitkan oleh *software* Matlab.

LAMPIRAN B

Biodata Penulis



Penulis bernama Moh. Fahmi Muzaki yang lahir di Lamongan pada 04 Desember 1992. Penulis merupakan anak terakhir dari pasangan suami istri A. Ridwan dan Siti Kholifah serta adik dari Abi Ya'la. Penulis menempuh pendidikan formal dari TK Alwardah NU Pucuk Lamongan (1997-1998), MI Ma'arif Pucuk Lamongan (1998-2004), MTs Negeri Babat Lamongan (2004-2007), MA Negeri Lamongan (2007-2010). Setelah lulus MA, penulis sempat bekerja sebagai seorang operator warnet. Kemudian pada tahun 2011, penulis melanjutkan studi di jurusan Matematika ITS Surabaya dan memilih bidang minat Matematika Terapan. Pada masa kuliah, penulis sangat aktif di organisasi UKM KSR PMI ITS. Di organisasi tersebut, penulis pernah menjadi staff Divisi Eksternal (semester 3-4), dilanjutkan menjadi Ketua Divisi Pengabdian Masyarakat dan Mobilisasi Relawan (semester 5-6), dan pada tahun terakhir penulis diamanahi menjadi Dewan Pertimbangan Pengurus (semester 7-8).

Informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditujukan ke penulis melalui email: mfm.zacky@gmail.com atau moh.fahmimuzaki@gmail.com